UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM TEMASCALTEPEC

“DETERMINACIÓN DE LA DIGESTIBILIDAD APARENTE Y EMISIONES DE METANO DE CUATRO TRATAMIENTOS CON ADITIVOS SUMINISTRADOS EN LA DIETA DE NOVILLOS EN CRECIMIENTO”

TESIS

P R E S E N T A:

MASSIEL GUILLERMINA JIMÉNEZ NOVA

COMO REQUISITO PARCIAL DE EVALUACIÓN PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA AGRÓNOMA ZOOTECNISTA

GENERACIÓN: 2021 - 2026

NÚMERO DE CUENTA: 1614109

ASESOR:

DR. OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

COASESORA:

DR. FRANCISCA AVILES NOVA

REVISORES: DR. ERNESTO JOEL DORANTES CORONADO - ING. AGRO. FERNANDO GARCIA NUÑEZ

TEMASCALTEPEC, MÉXICO, JULIO DE 2026

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación “SECIHTI” con clave SECIHTI 317413. Por el financiamiento a este trabajo a través del proyecto de investigación “Rescate y mejoramiento participativo de prácticas agroecológicas tradicionales de producción de carne y leche de las regiones de clima tropical de México para mejorar el autoabasto de alimentos de calidad de las familias campesinas vulnerables” bajo responsabilidad del Dr. Octavio Alonso Castelán Ortega.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... **ii**

RESUMEN **1**

I. INTRODUCCIÓN **3**

II. OBJETIVOS **5**

Objetivo General 5

Objetivos específicos 5

III. HIPÓTESIS **6**

IV. JUSTIFICACIÓN **7**

V. REVISIÓN DE LITERATURA **9**

5.1 Digestibilidad aparente 10

5.2 Digestibilidad real 10

5.3 Determinación de la digestibilidad *in vivo* 12

5.4 Determinación de la digestibilidad *in vitro* 16

5.5 Funcionamiento del rumen 17

5.6 Síntesis de CH_4 en el rumen 23

VI. MATERIALES Y MÉTODOS **29**

6.1 Área de estudio 29

6.2 Diseño experimental 29

6.3 Periodo de tiempo del experimento 29

6.4 Material de estudio 30

6. 4. 1 Descripción de los animales 30

6. 4. 2 Descripción de la dieta 32

6. 4. 3 Descripción de los aditivos 33

6.5 Variables evaluadas 36

6. 5. 1 Medición de CH_4 36

6. 5. 2 Determinación de la digestibilidad aparente..... 38

6.6 Análisis estadístico..... 41

VII. RESULTADOS..... 43

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... 47

IX. CONCLUSIÓN..... 53

X. REFERENCIAS 54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales AGV del rumiante..... 21

Cuadro 2. Población microbiana del rumen 24

Cuadro 3. Tratamiento experimental (cuadro latino 4x4)..... 29

Cuadro 4. Composición de la dieta base. 32

Cuadro 5. Declaración nutrimental de la dieta base (por casa 100 g) ..... Error! Bookmark not defined.

Cuadro 6. Aditivos-Tratamientos experimentales (g de MS/día/cada animal).34

Cuadro 7. Promedios de emisión de CH_4, CMS, rendimiento, IE de CH_4, DMS% y producción de heces, respectivamente, para los cuatro tratamientos a las 24 horas, 48 horas y 72 horas. 43

Cuadro 8. Promedios de CMS, GDP, CMSD, CFDN, contenido de FDN en heces, CFDN digestible y DFDN % para los cuatro tratamientos a las 24 horas, 48 horas y 72 horas. 45

Cuadro 9. Porcentaje de fenoles totales, taninos totales y taninos condensados de los aditivos suministrados. 46

Cuadro 10. Porcentaje de inclusión fenoles totales, taninos totales y taninos condensados por cada gramo de MS de aditivo suministrado en los tratamientos. 46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema anatómico y fisiológico del rumen bovino. 19

Figura 2, 3, 4 y 5. Animales utilizados para el experimento 31

Figura 6. Acondicionamiento de cámaras para el confort animal..... 32

Figuras 7, 8, 9, 10 y 11. Ingredientes utilizados para la dieta base 33

Figura 12, 13, 14 y 15. Aditivos utilizados para los tratamientos experimentales. 35

Figura 16. Cámaras de medición de emisión de CH_4 36

Figuras 17 y 18. Equipo de mediciones de emisión de CH_4. 38

Figuras 19, 20, y 21. Jaulas metabólicas y sus componentes. 39

Figura 22. Horno de secado. 40

RESUMEN

La ganadería es un pilar importante para la seguridad alimentaria a nivel mundial, sin embargo, actualmente enfrenta el desafío de abastecer la demanda de alimentos de origen animal y al mismo tiempo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico. La producción bovina es una importante fuente de emisión de metano, que genera el 39% de emisiones entéricas agrícolas globales; además tiene un efecto 28 veces mayor de calentamiento que el CO_2, con una duración aproximada de 9 a 15 años en la atmósfera. La producción de gas metano es un proceso biológico natural en los rumiantes, ocasionado por la fermentación entérica de los forrajes dentro del rumen, aunque también representa una pérdida de energía de hasta un 12% que podría ser dirigida a parámetros productivos como la GDP o la producción de leche.

Esta investigación se enfocó particularmente en la producción bovina del trópico mexicano, donde se han utilizados localmente plantas leguminosas y arbóreas con concentraciones considerables de metabolitos secundarios, en lo que respecta a fenoles y taninos derivados de los polifenoles, que han sido estudiadas anteriormente como posible solución para ayudar a reducir las emisiones de metano en la ganadería y al mismo tiempo mejorar los parámetros productivos del animal.

El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la complementación de 4 tratamientos con diferente nivel de inclusión de aditivos sobre la digestibilidad aparente y emisiones de CH_4 de cuatro novillos en crecimiento de la raza Holstein friesian. El experimento se realizó en el Laboratorio de Investigación en Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la FMVZ perteneciente a la UAEMex; el laboratorio cuenta con dos cámaras de respiración de circuito abierto conectadas un equipo especializado que mide las emisiones de CH_4, así como una jaula metabólica que permite medir el consumo y la producción de heces para determinar por método directo la digestibilidad aparente. El diseño experimental utilizado fue un cuadrado latino 4x4, donde a los animales se le brindo una dieta base y los cuatro diferentes tratamientos complementado con aditivos en dosis específicas, TA que

es el tratamiento comparativo; TB con 220 g de MS de *Crescentia alata*; TC con 175 g de MS de *Gliricidia sepium* y 175 g de MS de *Guazuma ulmifolia*; TD con 110 g de MS de *Crescentia alata*, 87.5 g de MS de *Gliricidia sepium*, 87.5 g de MS de *Guazuma ulmifolia* y 124 g de MS de *Cosmos bipinnatus*. Los resultados que no mostraron diferencias estadísticamente significativas, afirman que los tratamientos no tienen efecto sobre el consumo, las emisiones de CH_4 ni la palatabilidad de la dieta. Sin embargo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la IE de CH_4, producción de heces, GDP, contenido de FDN en heces y digestibilidad de la FDN; donde los tratamientos TC y TD, resultaron ser los más eficientes. El tratamiento TC optimizó la fermentación de carbohidratos y mejoró la digestibilidad de la fibra hasta un 52%, explicando la más baja IE de CH_4, esto sugiere que la reducción de energía que se pierde en forma de CH_4 fue dirigida posiblemente hacia la GDP (26%). También podría explicarse que se debe al aumento del flujo de la PNDR. En el tratamiento TD, la DFDN% disminuyó y la producción de heces aumentó, debido a la aportación de fibra indigestible, sin embargo, la combinación de los aditivos que forman complejos estables tanino-proteína, protegen a la proteína de la degradación ruminal excesiva, incrementaron el flujo de proteína de sobrepaso (PNDR) hacia el intestino delgado, lo que pudo ser reflejado en la GDP. En conclusión, la adición de ciertos aditivos constituye una estrategia viable para su aplicación, siempre y cuando exista un equilibrio para mejorar la productividad y a la par reducir las emisiones de CH_4. Es recomendable seguir investigando los diferentes niveles de inclusión y evaluar con mayor profundidad los mecanismos microbiológicos responsables de estos efectos, para fortalecer su aplicación en sistemas ganaderos pertenecientes al trópico de México.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la producción ganadera constituye una de las principales actividades agropecuarias a nivel mundial, desempeñando un papel esencial en la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de regiones productoras (FAO, 2017); sin embargo esta actividad enfrenta desafíos, principalmente el de incrementar la eficiencia productiva mientras se reduce su impacto ambiental, particularmente en lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero, entre los cuales destacan las emisiones de CH_4, producidas por fermentación entérica en rumiantes representa una pérdida significativa de energía bruta de la dieta (hasta un 12%) (Johnson & Johnson, 1995) y contribuye al calentamiento global con un potencial de 28 veces superior al dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2014). En este contexto, es necesario mejorar la digestibilidad de los nutrientes en la dieta mientras se mitigan las emisiones de CH_4 como objetivos prioritarios en la nutrición animal moderna (Vázquez Carrillo *et al*., 2023).

Es importante desarrollar estrategias de mitigación que reduzcan las emisiones de CH_4 sin comprometer el desempeño productivo de los animales. Entre estas estrategias destaca la inclusión de aditivos naturales o sintéticos en los rumiantes, como lo son los metabolitos secundarios que se encuentran en algunas plantas, estos modifican la fermentación entérica ruminal porque interfieren en la microbiota y afectan a los microorganismos metanogénicos encargados de la producción de CH_4 (Ku-Vera *et al.,* 2020).

Además de la mitigación ambiental, es fundamental evaluar el impacto de dichos aditivos sobre la digestibilidad aparente de los nutrientes, ya que cualquier intervención dietética debe mantener o mejorar la eficiencia de aprovechamiento de los alimentos y debe ser viable en sistemas de producción sustentables. La digestibilidad aparente constituye un indicador clave para estimar el valor nutritivo de una dieta y su efecto sobre el desarrollo o conversión alimenticia de novillos en crecimiento (NRC, 2001).

Por estas razones, el presente estudio tuvo como objetivo determinar la digestibilidad aparente y las emisiones de CH_4 de novillos en crecimiento sometidos a cuatro diferentes tratamientos dietéticos, con el fin de determinar el impacto sobre su digestibilidad y sobre el impacto ambiental de la producción. Los resultados pueden contribuir a hacer más eficientes las dietas en sistemas de producción bovina respectivas al trópico mexicano.

II. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el efecto de la complementación de cuatro tratamientos con diferentes aditivos sobre la digestibilidad aparente y emisiones de CH_4 en novillos en crecimiento de la raza Holstein friesian.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto del tratamiento (TB) con 220 g de MS de *Crescentia alata* sobre la digestibilidad aparente y emisión de metano.
2. Evaluar el efecto del tratamiento (TC) con 175 g de MS de *Gliricidia sepium* y 175 g de MS de *Guazuma ulmifolia* sobre la digestibilidad aparente y emisión de metano.
3. Medir el efecto del tratamiento (TD) con 110 g de MS de *Crescentia alata*, 87.5 g de MS de *Gliricidia sepium*, 87.5 g de MS de *Guazuma ulmifolia* y 124 g de MS de *Cosmos bipinnatus* sobre la digestibilidad aparente y emisión de metano.
4. Comparar el efecto del tratamiento de control (TA) (basado solamente en la incorporación de la dieta base) respecto a los otros tratamientos, midiendo también los factores de digestibilidad aparente y emisión de metano.

III. HIPÓTESIS

La complementación de los tratamientos con diferente nivel de inclusión de aditivos reduce las emisiones de metano sin afectar la digestibilidad aparente de los novillos en crecimiento.

IV. JUSTIFICACIÓN

La realización de esta investigación es fundamental por diversas razones que impactan a la sostenibilidad ambiental, la eficiencia productiva y la economía de los sistemas ganaderos, especialmente en regiones tropicales.

El CH_4 constituye el principal GEI derivado de la ganadería y su capacidad para inducir cambio climático es 28 veces más que el del CO_2 (principal gas de efecto invernadero), y los rumiantes son responsables del 39% de las emisiones de CH_4; por ello es importante desarrollar estrategias que favorezcan la mitigación de este gas en el sector pecuario y con ello contribuir a reducir el impacto ambiental y el cambio climático de origen ganadero. (Vázquez Carrillo *et al*., 2023)

La producción de CH_4 no solo es un problema ambiental, sino una ineficiencia biológica que representa una pérdida de entre el 2% y el 12% de la energía bruta consumida por el animal (Piñeiro Vázquez *et al*., 2015). Al reducir estas emisiones, la energía que se pierde en forma de gas podría ser redirigida hacia procesos productivos como la GDP, lo que se traduce en una mayor producción de carne utilizando la misma cantidad de alimento, por lo que esta investigación busca hacer más eficiente la digestibilidad y la eficiencia energética del animal (Vázquez Carrillo *et al*., 2023), a la vez que se reduce el impacto de la ganadería sobre el medio ambiente.

Actualmente, se están desarrollando a nivel mundial diversas tecnologías para reducir la producción de CH_4 entérico, como el derivado nitro (3-nitrooxipropanol) que disminuye la emisión en hasta un 20%-60% de acuerdo al nivel de suplementación (Tseten *et al*., 2022); o bien el alga *Asparagopsis taxiformis* que puede reducir la producción de CH_4 en hasta un 50%-80% en ganado lechero (Tseten *et al*., 2022). Sin embargo, ambos son usados sólo a nivel experimental, pero con resultados promisorios. En el caso de México no existen esfuerzos similares, por lo tanto, es importante llevar a cabo investigaciones que permitan desarrollar alternativas locales para reducir la emisión de CH_4, ante los nuevos escenarios de cambio climático. En este sentido, el uso de especies arbóreas

nativas como *Crescentia alata* (cirian), *Gliricidia sepium* (cocoite) y *Guazuma ulmifolia* (caulote) constituye una alternativa de bajo costo y natural para reducir las emisiones de CH_4 del ganado bovino, además ya son usadas por los ganaderos, y se encuentran ampliamente disponibles en el trópico seco de México (Hernández Maldonado, 2012). Adicionalmente, estos recursos no compiten con la alimentación humana, reducen la dependencia de insumos importados y permiten a los productores mantener la productividad durante la época de escasez de pastos (Cruz Matías *et al*., 2025).

V. REVISIÓN DE LITERATURA

La digestibilidad es un estudio que establece en qué proporción un alimento es utilizado o digerido por el organismo animal (Henao *et al,* 1972). Las pruebas de digestibilidad son cruciales para estimar la proporción de nutrientes presentes en la ración que pueden ser absorbidos por el aparato digestivo del animal y, por lo tanto, no se eliminan con las heces (Costa *et al.,* 2012).

La digestibilidad es un indicador del valor nutritivo de un alimento (Barajas *et al*, 2021) que es considerada la medida más reproducible para un alimento dado (Van Soest, 1994). Se define como la proporción de MS consumida que no aparece en las heces (Ramírez, 2010).

La relación entre digestibilidad, uso de aditivos en la dieta y emisiones de metano es relevante, especialmente en rumiantes (novillos en crecimiento), debido a la eficiencia energética y el impacto ambiental del metano; los bovinos típicamente pierden alrededor del 6% de su energía ingerida como metano eructado (Johnson y Johnson, 1995). No obstante, la pérdida real puede variar ampliamente, con mediciones que oscilan entre el 2% y el 11% de la energía bruta consumida (GEI); los rumiantes pueden producir diariamente entre el 250 y 500 L de metano (Johnson y Johnson, 1995).

La manipulación de factores dietéticos es fundamental para reducir las emisiones de metano, el desarrollo de las nuevas estrategias de alimentación busca reducir la emisión de metano y aumentar la eficiencia energética de la dieta. Así se disminuye la contribución de emisiones del ganado al inventario atmosférico de metano mientras se mejora la eficiencia de la producción (Johnson y Johnson, 1995).

La digestibilidad esta esta intrínsecamente ligada a la productividad animal a través de la eficiencia energética y el consumo de alimento que clasifica el valor nutritivo de los alimentos. La eficiencia con la que los animales utilizan el alimento es vital para evaluar la capacidad productiva individual (Van Soest, 1994). Un mayor consumo de alimento, facilitado por una alta digestibilidad o una tasa de pasaje adecuado, se traduce en una mayor eficiencia productiva (McDonald, 2010). El

Índice de Valor Nutritivo (NVI), que es el producto de la ingesta relativa y la digestibilidad, ha sido sugerido como una medida de la productividad potencial de un alimento (Van Soest, 1994).

5.1 Digestibilidad aparente

La digestibilidad aparente (D_a) es una medición fundamental utilizada para estimar el valor nutritivo de los alimentos, particularmente en la nutrición de los rumiantes (Van Soest, 1994). Se puede definir como la fracción del alimento que desaparece como resultado de su procesamiento en el sistema gastrointestinal, asumiendo que es digerida o absorbida ya que no aparece en las heces (Barajas *et al,* 2021).

Convencionalmente, se considera el balance de la materia perdida en el pasaje a través del tracto digestivo (Van Soest, 1994). Es la proporción de MS consumida que no aparece en las heces (Ramírez, 2010), este balance se considera la medida más reproducible para una determinada ración (Van Soest, 1994). La D_a representa el resultado neto de la ingestión del alimento (McDonald, 2010).

El cálculo de la D_a se expresa como un coeficiente o porcentaje (McDonald, 2010), calculando como la diferencia entre la cantidad de nutriente consumido y la cantidad excretada en las heces, dividida por la cantidad consumida (Barajas, *et al,* 2021).

Algebraicamente, se puede expresar como:

$$\boldsymbol{Da = (F_i - P_r) / F_i}$$

(Ramírez, 2010).

5.2 Digestibilidad real

La digestibilidad real *(D_t)* es un estudio mediante el cual se establece la proporción de un alimento que es digerido y utilizado por el organismo animal para su correcto desarrollo (Henao *et al.,* 1972).

La diferencia clave entre la D_a y la D_t radica en el manejo de los productos metabólicos que se encuentran en las heces, ya que la D_a incluye perdidas metabólicas (Henao *et al.,* 1972).

Entonces la D_t se refiere al balance entre la dieta y los residuos de alimento escapado a la digestión, excluyendo los productos metabólicos y endógenos (Van Soest, 1994). En su cálculo se tienen en cuenta sustancias agregadas al material fecal, como células de descamación, enzimas y bacterias en el tracto digestivo (Henao *et al.,* 1972).

La D_t es siempre mayor que la D_a, cuando hay perdida metabólica fecal porque el material metabólico constituye la diferencia entre ambas mediciones (Van Soest, 1994).

En cuanto a las fracciones nutricionales de la fibra y los carbohidratos no hay perdida fecal metabólica significativa, por lo que los coeficientes de D_a son iguales a los de la D_t (Van Soest, 1994).

La importancia de la D_t es significativa porque representa la parte del alimento disponible para la digestión por las enzimas microbianas o animales (Ramírez, 2010). Además, proporciona un índice más exacto de la cantidad de alimento digerido por el animal (Henao *et al.,* 1972).

La medición de D_a subestima a la D_t porque parte del material excretado proviene del propio animal y no directamente de la dieta (McDonald, 2010). La D_t es el factor que aísla los modelos matemáticos de Lucas Test para describir la calidad nutritiva de los componentes del alimento (Van Soest, 1994).

Los sistemas para determinar la digestibilidad real son generalmente más laboriosos que los métodos para determinar la D_a (Henao *et al.,* 1972). Se utilizan métodos de laboratorio *in vitro* (Ramírez, 2010); que utiliza las técnicas de:

- Tilley y Terry
- Modificación con Detergente Neutro (ND)

- Sistemas de Celulasa

(Van Soest, 1994).

También pueden ser utilizados los métodos de modelos matemáticos, como

- Lucas Test: Es una aplicación estadística diseñada para identificar fracciones del alimento que poseen digestibilidades reales uniformes a lo largo de una amplia gama de alimentos, esto implica una regresión de la cantidad digerible de un componente sobre su consumo donde la pendiente de la regresión es una estimación de la D_t y la intersección negativa de la regresión estima la cantidad metabólica (Van Soest, 1994).
- Modelos multicompartimentales: Perteneciente al NRC para estimar el Total de Nutrientes Digestibles (TDN) (Costa *et al.,* 2012).

5.3 Determinación de la digestibilidad *in vivo*

La determinación de la digestibilidad *in vivo* es el estudio mediante el cual se establece la proporción de un alimento que es utilizado o digerido por el organismo animal, representando le porción del animal que es capaz de absorber y utilizar para el desarrollo de su cuerpo (Henao *et al.,* 1972).

La digestibilidad *in vivo* se define como la medición más reproducible para un alimento dado y es la mejor manera de realizar una prueba de digestibilidad (Van Soest, 1994). Sin embargo, con el tiempo se han buscado métodos más sencillos debido a su alto costo y excesiva duración (Henao *et al.,* 1972).

Los métodos para determinar la digestibilidad *in vivo* se clasifican en directos e indirectos (Ramírez, 2010).

1. Métodos directos (Colección Total de Heces – CTH)

La colección total de heces (CTH) es el método más confiable para medir la digestibilidad (Lachmann & Febres, 2009).

El procedimiento consiste en medir la ingestión de la ración de composición conocida y la colecta total de la excreción fecal correspondiente del alimento consumido; las muestras del alimento ofrecido, el rechazo (si se ofrece *ad libitum*), la orina y las heces son analizadas en el laboratorio (Henao *et al.,* 1972).

El coeficiente de digestibilidad se calcula como el porcentaje del nutriente ingerido que no se recupera en heces (Lachmann & Febres, 2009).

$$\textit{Coeficiente de digestibilidad (\%)} = [(NI - NH) / NI] \times 100$$

Dónde: NI = Nutriente ingerido; NH = Nutriente en heces

Para la logística del ensayo:

- Animales de estudio: Se utilizan animales machos o castrados, ya que facilitan la separación de heces y orina (McDonald, 2010). Los animales deben estar confinados a jaulas de digestibilidad (metabólicas) o en libre pastoreo con arneses especiales (Barajas, *et al.*, 2021).
- Periodo preliminar (Adaptación): Se requiere un periodo preliminar de al menos dos semanas (mínimo de 10 días para rumiantes) para acostumbrar a los animales a la dieta, las instalaciones y el manejo, para asegurar que el tracto digestivo elimine los residuos de dietas previas (Vázquez Carrillo *et al*., 2023).
- Periodo de colección: Después de la adaptación, la medición de la ingesta y la excreción fecal se registra en un periodo de colección que suele durar de 7 a 10 días; para rumiantes se permite un tiempo de latencia arbitrario de 24 a 48 horas para el pasaje de los residuos de alimento antes de comenzar la recolección fecal (McDonald, 2010).

2. Métodos indirectos (Uso de marcadores)

Estos métodos se emplean cuando es impráctico o imposible medir la ingesta de alimento o la excreción fecal total; se basan en el uso de marcadores o indicadores,

sustancias fisiológicamente inertes que no son absorbidas ni digeridas en el tracto digestivo (Lachmann y Febres, 2009).

Tipos de marcadores

- **Marcadores internos**: Son constituyentes naturales del alimento. El más conocido es la lignina (Henao *et al.,* 1972), que ha sido usualmente utilizada considerada indigerible, aunque no es totalmente inerte, ya que parte de la estructura es degradada o modificada (Lachmann y Febres, 2009). Otros marcadores internos incluyen las cenizas insolubles en ácido (CIA), principalmente sílice (McDonald, 2010) y los cromógenos (Henao *et al*., 1972). El uso de AIA/CIA es ventajoso porque su determinación es sencilla y económica (Barajas *et al.,* 2021).
- **Marcadores externos**: Sustancias químicas que se suministran al animal, como el óxido de cromo Cr_2O_3 o la fibra cromo mordentada; el Cr_2O_3 es muy insoluble y se ha usado comúnmente, a menudo administrando en capsulas de gelatina. (Lachmann y Febres, 2009).

Respecto al cálculo de marcadores, el coeficiente de digestibilidad se determina a partir de la relación entre la concentración del indicador en el alimento de las heces (McDonald, 2010).

En el caso de la digestibilidad de la MS y cualquier otro nutriente se han propuesto las siguientes formulas:

$$DMS\ \% = (1 - CMF/CMH) \times 100$$

Dónde: *CMF* = Concentración del marcador en el forraje (%); *CMH* = Concentración del marcador en las heces (%).

3. Otras técnicas *in vivo*

Cámaras de respiración de animales enteros

Se utilizan para realizar mediciones precisas de emisiones, incluido metano del rumen y la fermentación del intestino posterior (Johnson & Johnson, 1995). La cuantificación del CH_4 se realiza típicamente en cámaras de respiración de circuito abierto (Vázquez Carrillo *et al*., 2023). Determinar la energía metabolizable (EM) requiere un ensayo de alimentación similar al de la digestibilidad, pero con recolección adicional de orina y metano (McDonald, 2010).

Modelos calorimétricos

El total de nutrientes digestibles (TDN) se puede estimar *in vivo* mediante un método calorimétrico (MET 2), lo cual se considera más confiable porque utiliza directamente los valores de la energía bruta (Costa *et al.,* 2012).

Fistulización

Se utilizan animales fistulados, como equipados con una cánula ruminal, para estudiar la degradabilidad *in sacco* (o *in situ*) (Ramírez, 2010), o la fistula esofágica para obtener muestras representativas del forraje consumido por animales en pastoreo (McDonald, 2010).

Aplicación de ensayos de digestibilidad *in vivo*

- **Evaluación de suplementos**: Se utiliza un grupo de animales con características específicas para proporcionarles suplementos y evaluarlos con periodos experimentales donde se mide el consumo de MS y la producción total de heces y orina, aspectos relacionados con la evaluación de la digestibilidad de un suplemento suministrado en la dieta (Vázquez Carrillo *et al.,* 2023).
- **Comparación de métodos de TND**: También se utiliza un grupo específico de animales de estudio con características similares para realizar pruebas de digestibilidad, donde se determina la producción de materia fecal mediante un procedimiento tradicional de colecta total de heces (Costa *et al.,* 2012).
- **Evaluación de forrajes**: Se comparan métodos de diferentes sistemas como el de colección de heces en bovinos, incluyendo un periodo de habituación

al experimento para recolectar una muestra significativa de heces (Henao *et al.,* 1972).

Consideraciones adicionales

- **Intake (*Ad Libitum* o consumo restringido)**: La medición de consumo *ad libitum* (voluntario) se realiza ofreciendo un excedente de alimento (15-20% por encima de lo consumido), lo que produce rechazos, pero si se restringe el consumo, significa que el animal debe consumir todo el alimento ofrecido (Van Soest, 1994).
- **Reproductibilidad**: La digestibilidad es la medición de valor nutritivo más reproducible, en ensayos controlados con ingesta restringida, la variabilidad mínima es aproximadamente de 2 unidades de TND, pero la evaluación aumenta con dietas de baja calidad o mayor consumo (Van Soest, 1994).
- **Efectos asociativos**: La determinación de la digestibilidad de un suplemento por diferencia asume que el alimento de prueba puede tener efectos sobre la digestibilidad de la dieta basal, lo cual no siempre es cierto (efectos asociativos) (NRC, 2001).

La digestibilidad de la MS aparente (DMS%), se calcula con la siguiente formula:

DMS, % = [(MS consumida kg – MS excretada en heces kg) / MS consumida kg] x 100

(Barajas, *et al.,* 2021).

5.4 Determinación de la digestibilidad *in vitro*

La experimentación in vitro se lleva a cabo por diversos métodos que, básicamente, pretenden simular las condiciones y medios del tracto digestivo de un poligástrico en laboratorio (Henao *et al.,* 1972). Estos métodos han sido perfeccionados para ofrecer una alternativa a las costosas y largas pruebas de digestibilidad *in vivo* (convencionales) (Costa *et al.,* 2012).

Un principio clave de las técnicas *in vitro* es su relación con la digestibilidad verdadera (Ramírez, 2010). Los métodos de laboratorio están más relacionados con la digestibilidad verdadera que con la aparente porque son incapaces de estimar pérdidas metabólicas fecales de origen endógeno (Van Soest, 1994).

El método más conocido y estandarizado para estimar la digestibilidad *In Vitro* es la técnica de las dos etapas de Tilley y Terry (TT) (1963).

Las limitaciones del método *in vitro* (TT) en la práctica se deben a la variabilidad de los resultados obtenidos con esta técnica, que son explicados por factores como: la variabilidad del inóculo ruminal (licor), el tamaño de partícula de la muestra, el peso del sustrato, la relación del inoculo: buffer y la duración de la incubación.

En general, la divergencia del a precisión de las medidas entre los métodos *in vivo* e *in vitro* lleva a recomendar los primeros métodos de elección (Costa *et al.,* 2012).

5.5 Funcionamiento del rumen

El rumen es un órgano esencial para la nutrición de los rumiantes, ya que alberga un microbioma denso y complejo (Andersen *et al.*, 2021) que degrada y fermenta carbohidratos complejos de biomasa vegetal, de otro modo indigeribles (Aguilar, 2019). Este proceso fermentativo es vital, ya que produce ácidos grasos volátiles (AGV), como el acetato, propionato y butirato, que son la principal fuente de energía para el animal hospedero, cubriendo más de 70% de su suministro energético (Andersen *et al.*, 2021). Por lo tanto, modular esta fermentación anaeróbica metanogénica mejora la eficiencia energética y productividad del animal y también reduce al mismo tiempo el impacto ambiental de la ganadería al reducir las emisiones de CH_4 (Ramírez y López, 2014).

1. Anatomía y función general del rumen

El estómago de los rumiantes adultos se divide en cuatro compartimentos: el retículo, el rumen, el omaso y el abomaso (García & Gingins, 1969). En un rumiante adulto, los preestómagos (retículo, rumen y omaso) ocupan hasta un 75% de la

cavidad abdominal; solo el abomaso es glandular y funcionalmente análogo al estómago de los no rumiantes (Relling & Mattioli, 2003). El retículo rumen es la cámara de fermentación más grande, constituyendo entre el 62% y el 90% de la capacidad gástrica total (Van Soest, 1994):

- **Rumen:** Es el compartimento más voluminoso, recubierto por un epitelio con proyecciones digitiformes llamadas papilas (Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001). El desarrollo de estas papilas es estimulado por los AGV, lo que aumenta la superficie para su absorción.
- **Retículo:** Está separado del rumen por el pliegue rúmino-reticular, pero funcionan como una sola unidad; su mucosa presenta pliegues en forma de panal (celdas poligonales).

La función principal del rumen es la degradación y fermentación de carbohidratos complejos de biomasa vegetal (celulosa, emicelulosa y lignina) ya que el rumiante carece de enzimas propias para digerirlos (Andersen *et al.*, 2021). Los microorganismos alojados en el rumen realizan esta digestión fermentativa (Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001).

Las condiciones del rumen (anaerobiosis, temperatura y pH) son cuidadosamente reguladas para favorecer el crecimiento microbiano, actuando como un inmenso medio de cultivo líquido (Andersen *et al.*, 2021).

- Anaerobiosis: Es un sistema altamente anaeróbico/reductor, esencial para el metabolismo microbiano.
- Temperatura: Mantenida entre 38°C y 42°C, siendo optima alrededor de 39°C.
- pH: Debe mantenerse en un rango de 6.0 a 6.8. La regulación del pH es crucial y se logra gracias a la abundante secreción de saliva (rica en bicarbonatos y fosfatos) que actúa como tampón, y la rápida absorción de los ácidos grasos producidos.

La motilidad del retículo-rumen también es un aspecto fundamental, ya que generan las contracciones primarias y secundarias que garantizan la mezcla del contenido, la progresión del alimento fino hacia el omaso, y la eliminación de desechos gaseosos (Relling y Mattioli, 2003):

1) Mezcla: Facilita el contacto del alimento con los microorganismos.
2) Rumia: Es la regurgitación del contenido del retículo para ser remasticado (conminución), insalivando y devuelto al rumen, lo que acelera el proceso de digestión de la fibra. La rumia es estimulada por la textura gruesa del forraje.
3) Eructación: Elimina los gases producidos por la fermentación (CO_2 y CH_4).

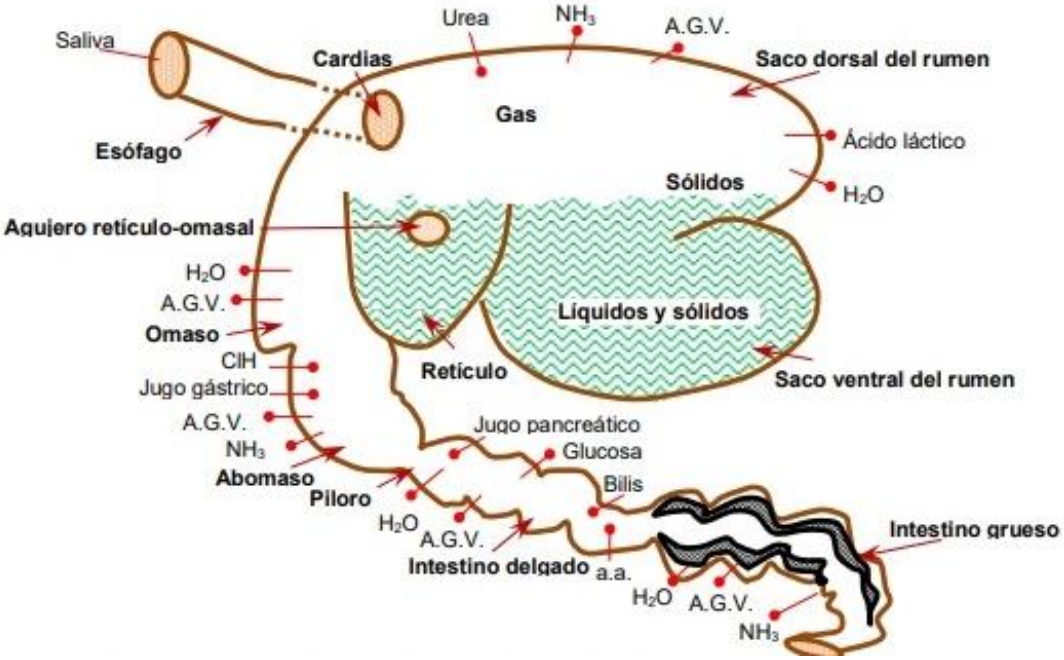


Figura 1. Esquema anatómico y fisiológico del rumen bovino.

Nota. Tomado de *El bovino lechero y su rumen*, por J. S. Jiménez, 2020, Engormix.com

2. Microbiota ruminal: (bacterias, protozoos, hongos y arqueas metanogénicas).

La microbiota ruminal es una comunidad densa y compleja de microorganismos que interactúan estrechamente (Andersen *et al.*, 2021).

Bacterias

- Son las más abundantes, con una concentración de 10^{10} a 10^{11} por milímetro de contenido ruminal, constituyendo una gran parte de biomasa y de la actividad metabólica (Aguilar, 2019).
- Se agrupan funcionalmente en celulolíticas (*Ruminococcus*, *Fibrobacter*), amilolíticas (*Streptococcus bovis*, *Bacteroides*), lactolíticas, proteolíticas y ureolíticas, entre otras (Relling y Mattioli, 2003).
- Las bacterias celulolíticas son responsables de la mayor parte de la actividad de degradación de la fibra y pueden sintetizar sus proteínas a partir de nitrógeno no proteico (NNP), como el amoníaco (Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001).

Protozoos (Protozoarios)

- Aunque su concentración es menor (de 10^4 a 10^6/ml), su gran tamaño individual hace que su masa total pueda ser comparable a la de las bacterias (Andersen *et al.*, 2021).
- Una función crucial es moderar la fermentación de sustratos rápidos (como el almidón), ya que engloban estas partículas, protegiéndolas de la acción bacteriana inmediata y permitiendo que pasen al intestino para su digestión posterior (Relling y Mattioli, 2003).
- Los protozoos pueden albergar arqueas metanogénicas en su superficie (ectosimbiosis) contribuyendo significativamente a la producción de CH_4 (Van Soest, 1994).

Hongos

- Son estrictamente anaeróbicos, y constituyen cerca del 8% de la biomasa microbiana (Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001).

- Poseen una importante capacidad celulítica y son relevantes por su habilidad para degradar celulosa unida a lignina, especialmente en forrajes maduros o encañados, utilizando rizoides para penetrar las paredes celulares (Relling y Mattioli, 2003).

Arqueas metanogénicas

- Son microorganismos estrictamente anaeróbicos que pertenecen a un dominio distinto al de las bacterias (Van Soest, 1994).
- El género dominante es *Methanobrevibacter*, su principal función es producir CH_4 como una estrategia metabólica para obtener energía; utilizan H_2 y CO_2 generados por otros microorganismos durante la fermentación (Ku-Vera *et al.*, 2020).

3. Fermentación de carbohidratos y producción de ácidos grasos volátiles (AGV)

Los carbohidratos son el sustrato principal y la fuente de energía del rumiante (Aguilar, 2019). La fermentación comienza con la hidrólisis de los carbohidratos complejos por enzimas microbianas, liberando azúcares (Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001). Estos azúcares son absorbidos por los microorganismos y siguen vía glucolítica hasta piruvato (Ramírez y López, 2014).

El piruvato es fermentado para producir los AGV que son los principales productos finales y la fuente de energía más importante para el rumiante, representado más del 70% del suministro energético (García & Gingins, 1969).

Cuadro 1. Principales AGV del rumiante

AGV	Dieta predominante	Función en el rumiante
Ácido acético (C_2)	Fibra (forrajes)	Fuente energética (oxidación) y lipogénico (síntesis de grasa).
Ácido propiónico (C_3)	Almidón (concentrados)	Glucogénico (principal precursor de glucosa en el hígado).

Ácido butírico (C_4)	Concentrados	Convertido en β-hidroxibutirato (cuerpo cetónico) en la pared ruminal, usado para energía.

(Nava Cuéllar y Díaz Cruz, 2001).

La proporción molar de los AGV varia drásticamente según la dieta (McDonald, 2010):

- Dietas ricas en fibra (forraje): Producen una alta proporción de acético (aprox. 70%).
- Dietas ricas en concentrado (almidón): Favorecen la producción de propionato (hasta 40%).

4. Relación entre fermentación, digestibilidad y formación de metano.

La producción de CH_4 es el mecanismo esencial para eliminar el hidrógeno molecular (H_2), liberando durante la fermentación de los carbohidratos (Relling y Mattioli, 2003). Si el H_2 se acumula, se inhibe la reoxidación del NADH a NAD, deteniendo la glucólisis y la digestión (Ramírez y López, 2014).

La reacción principal comienza con las arqueas metanogénicas que utilizan el H_2 y CO_2 para sintetizar metano:

$$CO_2 + 4H_2 _ CH_4 + 2H_2O$$

(Ku-Vera *et al.*, 2020).

El CH_4 representa una pérdida de energía para el rumiante, entre el 2% y el 12% de energía bruta (EB) o hasta 18% de la energía digestible (ED) en dietas de baja calidad y contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Portela *et al*., 2022).

El patrón de fermentación de los carbohidratos impacta directamente la producción de CH_4:

- Producción de acético: Las vías metabólicas que producen acético generan H_2, por lo que las dietas ricas en fibra (que producen acético) se asocian a una alta relación acético-propiónico y una mayor producción de CH_4 (Johnson & Johnson, 1995). Si toda la fermentación fuera acético, la perdida de la energía como CH_4 podría ser del 33% (Aguilar, 2019).
- Producción de propionato: La síntesis de propionato es una vía metabólica que consume H_2 (Ramírez y López, 2014). Por lo tanto, dietas altas en almidón (que promueven propionato) son más eficientes energéticamente y menos metanogénicas (Aguilar, 2019).

La eficiencia digestiva esta inversamente relacionada a la metanogénesis:

- Dietas de alta digestibilidad conllevan menores emisiones de CH_4 por unidad de alimento ingerido (Aguilar, 2019). Un aumento en el nivel de consumo o un mayor procesamiento del forraje (picado/peletizado) resalta en una mayor tasa de pesaje de la digestión, lo que reduce el tiempo de retención y disminuye la producción de CH_4 (Ramírez y López, 2014).
- pH ruminal: Dietas altas en concentrados que causan una disminución significativa del pH ruminal (hacia 5.5-6.0) también pueden inhibir el crecimiento de las bacterias metanogénicas, contribuyendo la reducción de CH_4 (Ramírez y López, 2014).

5.6 Síntesis de CH_4 en el rumen

La síntesis de CH_4 en el rumen (metanogénesis) es un proceso microbiológico esencial para el funcionamiento digestivo del rumiante, que a su vez representa una preocupación ambiental y una pérdida de eficiencia energética. La producción de CH_4 en el rumen es una estrategia metabólica fundamental que permite que el proceso de fermentación anaeróbica continúe (Ramírez y López, 2014).

1. Rol metabólico y mecanismo esencial

- Necesidad del sumidero de hidrogeno (H_2): Durante la glucólisis y la fermentación de los carbohidratos, se liberan grandes cantidades de

hidrogeno molecular H_2 y dióxido de carbono (CO_2) (Ku-Vera *et al.*, 2020). Si el H_2 se acumula, la presión alta inhibe la enzima NADH + H^+ ferredoxina oxidorreductasa; esto impide la regeneración de cofactor oxidado (NAD^+), deteniendo la glucólisis y, por ende, la degradación ruminal de los alimentos (Ramírez y López, 2014).

- Función de las arqueas: La síntesis continua de CH_4 por las arqueas metanogénicas es el mecanismo principal para mantener una baja presión de H_2 en el rumen (Aguilar, 2019).
- Transferencia interespecies: La remoción de H_2 es un caso de cooperación sintrópica; el hidrógeno producido por bacterias fermentativas (como *Ruminococcus albus*) es capturado por las arqueas metanogénicas, favoreciendo el flujo de electrones y permitiendo que las bacterias productoras continúen su fermentación (Ramírez y López, 2014).

2. Microorganismos involucrados

Los metanógenos pertenecen al dominio *Archaea* y son microorganismos estrictamente anaeróbicos (Van Soest, 1994):

Cuadro 2. Población microbiana del rumen

Población microbiana	Características y función
Arqueas metanogénicas	Es el principal factor biótico en la producción de CH_4 en el rumen (Aguilar, 2019). Su actividad metanogénica genera la energía necesaria para su supervivencia: la colonización del rumen es rápida, alcanzando densidades de 10^9 a 10^{10}/g en rumiantes alimentados con pasto (Ku-Vera *et al.*, 2020).
Géneros dominantes	Los metanógenos predominantes pertenecen al orden *Metanobacteria*. (Ramírez y López, 2014). Los géneros principales incluyen: *Methanobrevibacter* (*M. ruminantium*, *M. gottschalki*) y *Methanomicrobium spp.* (Ku-Vera *et al.*, 2020).

Simbiosis con protozoos	Existe una relación estrecha entre las arqueas y los protozoos ciliados, donde los metanógenos se adhieren a su superficie (ectosimbiontes) (Ku-Vera *et al.*, 2020) que viven como endosimbiontes); los protozoos poseen orgánulos llamados hidrogenosomas, que liberan H_2; esta asociación es responsable de una parte significativa de la metanogénesis ruminal (9-25% o hasta 37% de las emisiones entéricas) (Ramírez y López, 2014).

3. Sustratos y reacciones químicas

Los metanógenos ruminales utilizan principalmente H_2 para reducir el CO_2 (Ku-Vera *et al.*, 2020):

- Los sustratos principales: H_2 y CO_2 son el carbono y el principal donador de electrones para la metanogénesis.
- La reacción clave es: $CO_2 + 4H_2 _ CH_4 + 2H_2O$
- Otros sustratos: El formiato también es un donador importante de electrones y pueden contribuir hasta con el 18% del CH_4 producido; otros compuestos como las metilaminas, el metanol y el acetato también pueden ser sustratos, pero su contribución es mínima, especialmente el acetato, ya que es absorbido rápidamente por el rumiante (Ramírez y López, 2014).

4. Impacto energético y ambiental del metano

La metanogénesis, a pesar de ser esencial para la digestión, conlleva costos significativos:

Pérdida de energía

El CH_4 representa una pérdida de energía potencial que el animal no aprovecha, pues se transforma en gas y elimina principalmente por eructación (Aguilar, 2019). Esta pérdida fluctúa generalmente entre el 6% y el 10% de la EB del alimento

(McDonald, 2010). Puede ser tan baja como el 2% o llegar hasta el 12% (Ku-Vera *et al.*, 2020), o incluso hasta el 18% en dietas de baja calidad (Aguilar, 2019).

Impacto ambiental

El CH_4 entérico contribuye al incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) y al calentamiento global (Ramírez y López, 2014). El CH_4 tiene un potencial de calentamiento global estimado entre 25 y 28 veces mayor que el CO_2 (McDonald, 2010).

Vías de eliminación

El CH_4 sale del rumen principalmente por eructación (Portela *et al.,* 2022). Sin embargo, una parte del CH_4 puede ser absorbida a través de la pared ruminal y espirada por los pulmones y orificios nasales, lo que representa cerca del 98% del CH_4 total producido (Aguilar, 2019).

5. Factores que regulan y modulan la síntesis de CH_4

La síntesis de metano es altamente sensible a las condiciones del rumen, influenciada por la dieta, lo que permite el desarrollo de estrategias de mitigación (Portela *et al.,* 2022).

Efecto de la dieta y su relación con los AGV:

- Dieta alta en fibra/forraje: La fermentación de carbohidratos fibrosos (estructurales) produce un alto nivel de H_2 y una alta relación de acético-propiónico; la producción de acetato genera H_2 (glucosa $\rightarrow$ 2acetato + $2CO_2$ + $8H^+$), lo que resulta en una mayor producción de CH_4 (Aguilar, 2019).
- Dieta alta en almidón-concentrado: Favorece la producción de propionato (Ramírez y López, 2014). La síntesis de propionato es una vía que consume H_2 (glucosa + $4H^+$ $\rightarrow$ 2propionatos + $2H_2O$), lo que reduce el sustrato disponible para los metanógenos y hace que la dieta sea más eficiente energéticamente (Aguilar, 2019).

- Relación AGV: Si la relación acético-propiónico es 0.5, la perdida energética como metano es 0%; si todo el carbohidrato se fermenta solo en acético, la perdida podría ser del 33% (Aguilar, 2019).

Efecto del pH ruminal y tasa de pasaje

- Bajo pH: Las arqueas metanogénicas son sensibles a pH bajos y dietas altas en concentrado que resultan en un bajo pH ruminal (debido a alta producción de AGV) pueden inhibir el crecimiento de metanógenos, contribuyendo a la mitigación de CH_4 (Ramírez y López, 2014).
- Nivel de consumo y pasaje: Aumentar el nivel de consumo o procesar el forraje (picado o peletizado) incrementa la tasa de pasaje (Van Soest, 1994). Una tasa de pasaje más rápida reduce el tiempo de retención del alimento en el rumen, restringiendo a los metanogénos y disminuyendo la producción de CH_4 por unidad de alimento (Andersen *et al*., 2021).

Uso de aditivos y modificadores

La manipulación de la fermentación busca inhibir la producción de H_2 o dirigirlos a productos diferentes al CH_4 (Ramírez y López, 2014).

- Ionóforos: No son inhibidores directos, si no que restringen la producción de H_2 por las bacterias productoras (como *Rumminococcus* y *Butyrivibrio*), desviando el flujo de carbono hacia síntesis de propionato, generando inanición a los metanogénos (Van Soest, 1994).
- Metabolitos secundarios: Compuestos como taninos condensados, saponinas y aceites esenciales tienen el potencial de mitigar el CH_4 (Ku-Vera *et al.*, 2020). Existen mecanismos directos en donde se inhiben las arqueas metanogénicas; y mecanismos indirectos (defaunación), en donde las saponinas pueden romper la membrana de los protozoos y hongos, eliminando así a los metanógenos asociados a su superficie (Aguilar, 2019).

La clave de la mitigación del CH_4 es incrementar la eficiencia digestiva, lo cual mejora el desempeño animal y reduce el impacto ambiental de la producción ganadera (Ramírez y López, 2014).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El experimento se realizó en el Laboratorio de Investigación en Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables ubicado en la Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México; ubicado en la localidad El Cerrillo Piedras Blancas, perteneciente al municipio de Toluca, Estado de México. (Álvarez *et al*., 2016).

6.2 Diseño experimental

Este estudio de tipo experimental se llevó a cabo con un diseño de cuadrado latino 4x4, para poder evaluar el efecto de cuatro diferentes tratamientos con aditivos en la dieta que buscaban reducir las emisiones de CH_4 (Cuadro 3). Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza utilizando el programa estadístico Minitab.

Cuadro 3. Tratamiento experimental (cuadro latino 4x4)

Animal/Periodo	P1	P2	P3	P4
Rafita	TA	TB	TC	TD
Jacinto	TB	TC	TD	TA
Adolfo	TC	TD	TA	TB
Titán	TD	TA	TB	TC

P = Periodo que consta de 21 días. La descripción de los tratamientos se presenta en el Cuadro 5. La descripción de los animales de estudio se presenta en el inciso

6.3 Periodo de tiempo del experimento

El experimento tuvo una duración de 100 días, divididos en periodos:

- 15 días se asignaron para la adaptación de la dieta base más el aditivo correspondiente a ese periodo.
- 3 días permanecieron dentro de las cámaras de respiración, debido a que se evaluó la emisión de CH_4 emitida por un periodo de 72 h.
- 3 días destinados para el periodo de limpieza del tratamiento para pasar al siguiente periodo con distinto tratamiento, en base al diseño experimental.

Cada periodo de tratamiento en conjunto sumó 21 días, que de acuerdo al diseño 4x4 suman 84 días, más días de repetición de tratamientos por fallas técnicas en el equipo de medición de CH_4, suman 100 días.

6.4 Material de estudio

6. 4. 1 Descripción de los animales

Los animales utilizados para el experimento fueron 4 novillos de raza Holstein de 160 kg ± 10 kg de peso con edad de 10 ± 7 meses. El uso de estos animales se aprobó por parte del Comité de Ética y Bienestar Animal del Centro Universitario UAEM Temascaltepec.

Los procesos de experimentación se llevaron a cabo de manera estabulada, por lo que en cada periodo siempre se priorizó la salud, el confort y bienestar de los animales mediante un manejo general eficiente y planificado.

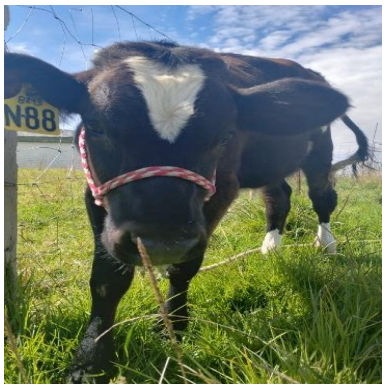








Figura 2, 3, 4 y 5. Animales utilizados para el experimento

Nota. Adolfo, Titán, Jacinto y Rafita respectivamente. Elaboración propia, 2025.

Los novillos en cámaras tuvieron acceso al aire acondicionado, temperatura confort de 16°C ± 2°C, agua y alimento *ad libitum*, así como periodos de descanso al aire libre entre cada lapso de medición de 24 horas. También se midieron las ganancias de peso semanalmente y cada que los animales terminaron los periodos de medición de 72 horas.



Figura 6. Acondicionamiento de cámaras para el confort animal.

Nota. Elaboración propia, 2025.

6. 4. 2 Descripción de la dieta

La dieta base estuvo compuesta de forraje (heno de avena) y concentrado (Cuadro 4). A esta dieta base se le adicionaron los tratamientos experimentales.

Cuadro 4. Composición de la dieta base.

Ingredientes	Consumo (kg MS/d)	% de inclusión	Dosis diaria de MF en kg/animal
Heno de avena	3.1	70.45	3.411
Maíz molido	0.5	11.36	0.575
Pasta de soja	0.3	6.82	0.332
Salvado de trigo	0.5	11.36	0.564
Total	4.4	100.0	4.882

Nota. Consumo kg MS/d = Consumo de materia seca (kg/día); MF en kg/animal = kilogramos de materia fresca que consume el animal al día.

El maíz molido, pasta de soja y salvado de trigo corresponden a los ingredientes del concentrado.



Figuras 7, 8, 9, 10 y 11. Ingredientes utilizados para la dieta base

Nota. Heno de avena molida y concentrado (compuesto por: maíz molido, pasta de soja y salvado de trigo respectivamente). Elaboración propia 2025.

6. 4. 3 Descripción de los aditivos

Al concentrado de la dieta se le adicionaron los cuatro diferentes tratamientos con diferente nivel de inclusión de aditivos herbáceos y arbóreos que se encuentran comúnmente en sistemas agrosilvopastoriles del trópico de México.

- **Cirian (*Crescentia alata Kunth*)**

El cirian pertenece a la familia de las bignoniáceas, y el aditivo fue obtenido en Chiapas. La parte de la arbórea utilizada fue el fruto con la semilla triturada, la cual

contiene 14% de proteína y 60% de carbohidratos aproximadamente. Sus semillas tienen alto porcentaje de aceites de una digestibilidad del 90% comparable al aceite de soya o el de oliva, con 26% de ácidos grasos poli-insaturados, que son fuente de energía.

- **Cocoite (*Gliricidia sepium*)**

El cocoite fue obtenido de Michoacán, es un árbol de tamaño mediano que pertenece a la familia de las leguminosas donde usualmente usan las hojas deshidratadas que contienen un alto porcentaje de proteína cruda de 18 a 30% aproximadamente y el valor de digestibilidad de la hoja seca va del 48 a 78 %.

- **Caulote (*Guazuma ulmifolia*)**

El calulote es una arbórea de la familia de las malváceas, fue obtenida de Michoacán y la parte utilizada fueron las hojas secas, presentando un contenido de Proteína Cruda de hasta 12.1 %, una Digestibilidad de 40 – 85%, y fibra cruda 26%.

- **Mirasol (*Cosmos bipinnatus*).**

El mirasol es una planta perteneciente a la familia de las asteráceas que ha mostrado propiedades antimetanogénicas por su contenido de polifenoles, que se han identificado en varias partes de la flor. Fue obtenida en el Estado de México en la posta zootécnica de la FMVZ y se utilizó toda la planta para la elaboración del aditivo.

Los aditivos previamente pasaron por proceso de secado natural en sombra a temperatura ambiental y posteriormente se disminuyó el tamaño de partícula con molino de cribas para mejorar la incorporación en la dieta.

Cuadro 6. Aditivos-Tratamientos experimentales (g de MS/día/cada animal).

Aditivo/Tratamiento	Cirian	Cocoite	Caulote	Cosmos

TA	0.000	0.000	0.000	0.000
TB	0.220	0.000	0.000	0.000
TC	0.000	0.175	0.175	0.000
TD	0.110	0.0875	0.0875	0.124

Nota. TA = Concentrado (Tratamiento A); TB = Tratamiento B; TC = Tratamiento C; TD = Tratamiento D.

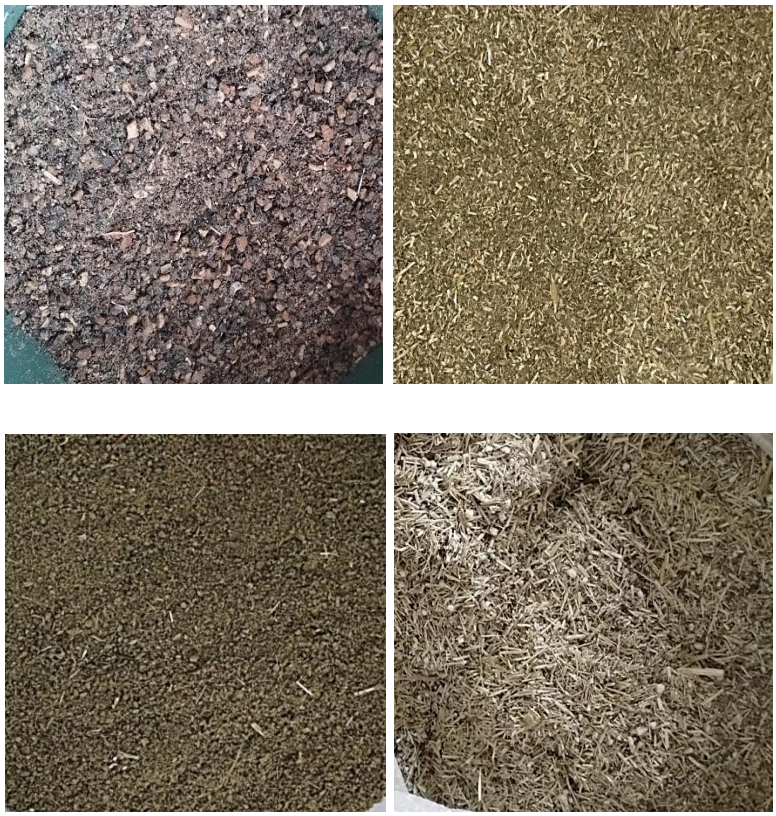


Figura 12, 13, 14 y 15. Aditivos utilizados para los tratamientos experimentales.

Nota. Cirian, cocoite, caulote y cosmos respectivamente. Elaboración propia, 2025.

6.5 Variables evaluadas

6. 5. 1. Medición de CH_4

Las emisiones de CH_4 se midieron en un equipo de la marca Sable Systems International, Las Vegas, Nevada, EEUU; el cual cuenta con dos cámaras de respiración de circuito abierto, en donde estuvieron los ejemplares de experimentación.



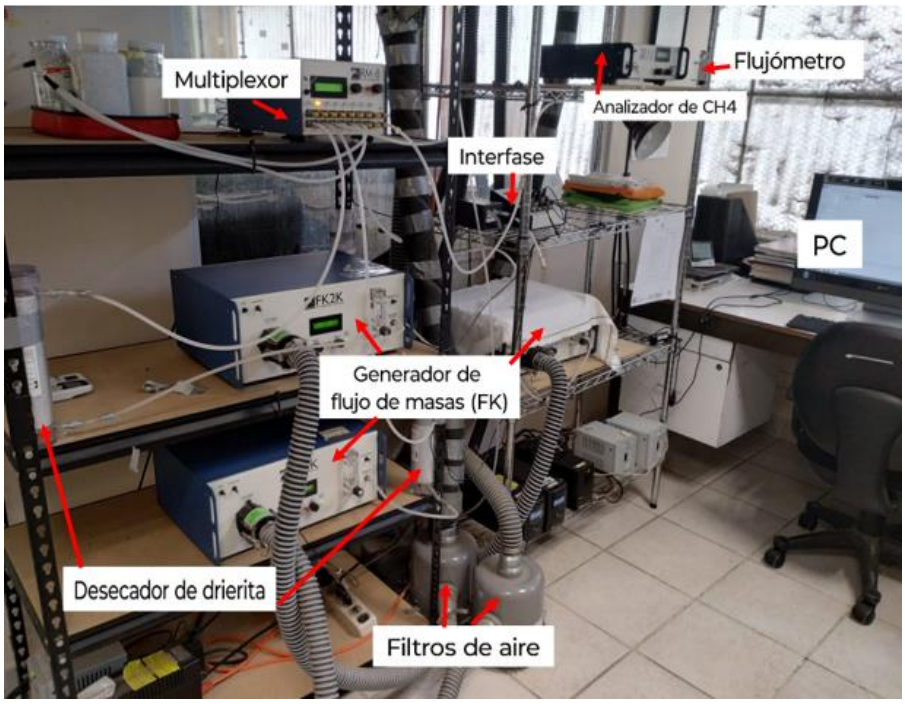
Figura 16. Cámaras de medición de emisión de CH_4

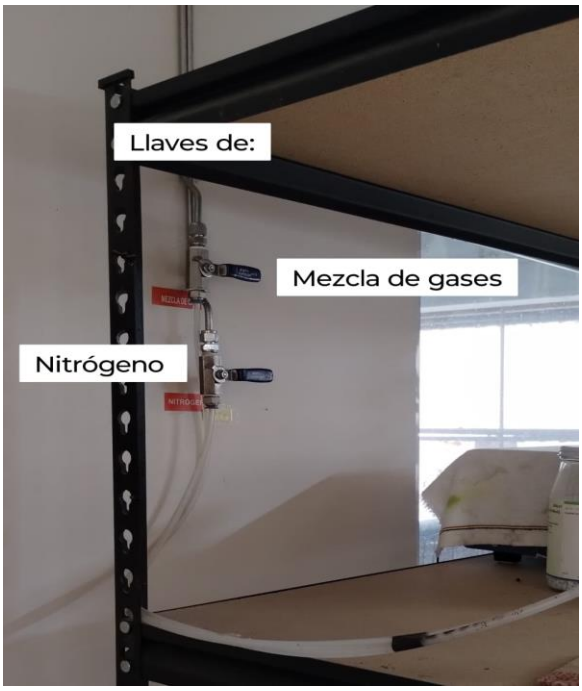
***Nota*.** Elaboración propia, 2025.

Estas cámaras están conectadas a un sistema de análisis de metano, vinculados con un multiplexor, interface y PC en donde está instalado un software que visualiza y guarda la información de las mediciones.

Durante el proceso de medición, el equipo es encendido 48 horas antes para precisar la detección de la concentración de CH_4. Se verificó que la drierita

desecante para los filtros de aire estuviera seca y azul (cuando adquiere humedad se torna rosa); también se revisó que los filtros de aire y las conexiones entre cada aparato estuvieron correctamente conectados y limpios. La calibración se hizo antes de que los animales entraran a cámaras, este proceso se realizó con gas de nitrógeno puro (N_2) para establecer un punto al 0.000% y con un flujo de 0.4 L/min para calibrar el equipo; posteriormente se indujo una mezcla de gases que contiene 0,099% de CH_4; cuando este número se mantuvo constante, el analizador regresó a 0.000% y se pasó N_2 nuevamente; este proceso se deberá configurar en el software de EXPEDATA. Para la extracción de CH_4 emitido en cámaras, se utilizó el flow-kit (FK-2K) con una capacidad de extracción de 800 L/min.





Figuras 17 y 18. Equipo de mediciones de emisión de CH_4.

Nota. Elaboración propia, 2025.

Las mediciones de CH_4 se realizaron cada 24 horas; al finalizar este lapso de tiempo se brindó una hora aproximadamente para limpieza de las cámaras, obtención de rechazos de alimento y muestras de heces de cada cámara, mientras que los novillos de experimentación estaban al aire libre. Este proceso se realizó 3 veces para tener 72 horas de medición.

6. 5. 2. Determinación de la digestibilidad aparente

Para obtener el porcentaje de digestibilidad, fue necesario obtener la cantidad total de consumo total y producción de heces totales generadas en las ja7ulas metabólicas que se encuentran dentro de las cámaras de respiración.







Figuras 19, 20, y 21. Jaulas metabólicas y sus componentes.

Nota. Dentro de las cámaras se encuentra una jaula metabólica acondicionada con calefactor, ventilación, piso antideslizante, comedero y bebedero con agua ad livitum que mantiene el confort del animal; esta estructura también sirvió para obtener muestras representativas del consumo total y la cantidad de heces producidas por los animales durante su estadía, ya que cuenta con rejillas en la parte inferior que colectan las muestras de heces totales. Posteriormente las muestras se pesan para obtener los datos que ayudaran a determinar la Da, así como las alícuotas para análisis bromatológicos. Elaboración propia, 2025.

Para obtener la MS se utilizó un horno de secado de laboratorio, en donde se colocaron dos muestras representativas de rechazo de alimento, heces y alícuotas de cada animal. Esto se hizo a una temperatura de 100°C durante 6 horas

aproximadamente. Para el análisis de las alícuotas de cada factor del experimento se recolectaron muestras representativas y se juntan en una sola (alícuotas); estas permanecerán 72 horas aproximadamente en el horno de secado a una temperatura de 60° C (Figura 19).



Figura 22. Horno de secado.

Nota. El horno eléctrico de secado de convección mecánica forzada y control digital de temperatura es de la marca ECOSHEL, modelo 9023A. Elaboración propia, 2025.

Para obtener el porcentaje de digestibilidad del animal fue necesario obtener los promedios de MS% del rechazo y de las heces excretadas durante las 24 horas donde los animales permanecieron en cámaras, posteriormente se deben aplicar las siguientes formulas en este orden respectivo.

Fórmula para obtener los porcentajes de MS de cada factor:

$$MS\% = \left(\frac{Peso\ inicial\ de\ la\ muestra}{Peso\ final\ de\ la\ muestra}\right)\ 100$$

1. Para obtener la cantidad total ofrecida al animal:

Total ofrecido de MS% = $Kg\ de\ MF\ ofrecido$ ** Promedio MS% del rechazo*

2. Para obtener el rechazo en MS

*Rechazo en MS = Rechazo (kg MF) * Promedio de MS del rechazo (obtenido de la muestra)*

3. Para obtener heces en MS

*Heces en MS = Heces (kg MF) * Promedio de MS de las heces (Obtenido de las muestras)*

4. Para obtener el consumo total en kg de MS

Consumo kg MS = Total ofrecido de MS% - Rechazo en MS

5. Para obtener la digestibilidad

$$Digestibilidad\ \% = \left(\frac{Consumo\ kg\ MS - Heces\ en\ MS}{Consumo\ kg\ MS}\right) 100$$

Se utilizó un registro de bitácora donde se identificó el periodo, tratamiento y animal que se encontraba en mediciones de CH_4 dentro de las cámaras, al igual que la cantidad ofrecida de alimento, los rechazos de alimento y la cantidad de heces excretadas. Con estos datos se determinó la digestibilidad de cada animal. En cada periodo experimental se obtuvieron 3 digestibilidades correspondientes a las 72 horas en que los animales estuvieron dentro de las cámaras. Posteriormente se obtuvo un porcentaje de digestibilidad total a cada periodo experimental por animal.

Digestibilidad % promedio = Digestibilidad % 24 horas + Digestibilidad % 48 horas + Digestibilidad % 72 horas

6.6 Análisis estadístico

Los resultados de digestibilidad y emisión de metano fueron analizados mediante la prueba estadística ANOVA para un diseño experimental de cuadrado latino:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + T_j + P_k + \varepsilon ijkl$$

Dónde: Y_{ijkl}es la variable de la respuesta que el i-ésimo animal (i=1, 2, 3, 4), recibió del j-ésimo tratamiento (j = 1, 2, 3, 4) durante el periodo k-ésimo (k = 1, 2, 3, 4); μ es la media general de todas las observaciones; A_i es el efecto aleatorio del animal; T_j son los efectos fijos del tratamiento; P_k es el efecto fijo del periodo; y $\varepsilon ijkl$ se refiere al error experimental de todas las observaciones, supuesto independiente distribuido con media de 0 y varianza unitaria (N, I; μ = 0 , σ = 1) (Vázquez Carrillo *et al.,* 2023). Cuando existieron diferencias significativas entre medias, se utilizó la prueba de Tukey. Los análisis se hicieron con el software estadístico MINITAB versión 19p.

VII. RESULTADOS

El Cuadro 7 presenta los resultados para las variables relacionadas con la emisión de CH_4, el consumo de materia seca (CMS) y la digestibilidad de la MS, el cual muestra que únicamente observamos diferencias estadísticamente significativas para la intensidad de emisión de CH_4 (IE, CH_4) ($p < 0.02$), y el promedio de producción de heces en MS por kg al día (Prom. Heces MS kg/d), $p< 0.01$. El tratamiento TB presenta una IE CH_4 significativamente mayor al tratamiento TC y TD, los cuales presentan los valores más bajos en particular el TD. Los tratamientos TD y TA no difieren de manera significativa ($p >0.05$) entre ellos, pero el valor más alto se observa en el tratamiento TB, prácticamente 200 g más de CH_4 que el tratamiento TA.

Cuadro 7. Promedios de emisión de CH_4, CMS, rendimiento, IE de CH_4, DMS% y producción de heces, respectivamente, para los cuatro tratamientos a las 24 horas, 48 horas y 72 horas.

Tratamiento	Prom. de emisión CH_4 g/d	Prom. CMS kg/d	Prom. Rendimiento CH_4/g/d	IE, g CH_4/kg GDP	Prom. DMS %	Prom. Heces MS Kg/d
TA	153.4 ± 25	6.7 ± 0.6	22.9 ± 3.1	459.0^{ab} ± 310	56.2 ± 4.1	2.9^{b} ± 0.5
TB	131.9 ± 24	5.8 ± 1.4	23.1 ± 2.4	656.0^{a} ± 370	56.2 ± 1.5	2.3^{b} ± 0.5
TD	148.2 ± 13.8	6.3 ± 0.3	23.4 ± 1.3	128.2^{b} ± 74.8	52.8 ± 2.2	3.0^{a}± 0.2
TC	139.6 ± 1.7	5.7 ± 0.7	24.7 ± 3.0	139.9^{b} ± 60.3	58.2 ± 0.8	2.3^{b} ± 0.2
Valor de p	0.31	0.20	0.26	0.02	0.08	0.01

Literales diferentes entre columnas difieren estadísticamente $P < 0.01$, ± = desviación estándar. Prom. de emisión CH_4 g/d = promedio de emisión de CH_4, gramos al día; Prom. CMS kg/d = promedio de consumo de MS (kg por día); Prom. Rendimiento CH_4/g/d = Promedio de CH_4 que emiten los animales por cada kg de MS consumida; IE= intensidad de la emisión en g CH_4/kg por cada kg de ganancia de peso (GDP). Prom. DMS % = Promedio de digestibilidad de la MS %; y Prom. de producción de heces MS Kg/d.

Con respecto a las emisiones de CH_4 por g/día no se observaron diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre tratamientos, sin embargo, la emisión más baja se observó en el tratamiento TB (cirian), el cual fue 14% más bajo que el tratamiento

TA, este tratamiento también presentó el segundo menor rendimiento de CH_4, aunque tampoco se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los rendimientos de CH_4. Para el promedio de producción de heces kg MS/d el tratamiento TD tuvo una mayor excreción de heces que los otros tratamientos (Valor $p = 0.01$), y a la par tuvo la digestibilidad más baja, mientras que los tratamientos TB y TC tuvieron la menor excreción, este último tratamiento también presentó la digestibilidad más alta, aunque esta diferencia no fue significativa ($p > 0.05$), mientras que el tratamiento TB presentó una digestibilidad similar al TC. Tampoco hubo diferencias significativas para el consumo de MS kg/día ($p > 0.05$). El porcentaje de digestibilidad de la MS ($P = 0.08$) presentó una tendencia cercana a $p = 0.05$ pero no fue significativa, siendo el tratamiento TC (58 %) el que presentó la digestibilidad más alta acompañado de una baja excreción de heces y baja intensidad de la emisión de CH_4, sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas.

Por lo tanto, los efectos de los diferentes tratamientos se reflejan principalmente en la IE de CH_4, donde TB es mayor que TC, siendo este el tratamiento con IE de CH_4 más baja, mientras que los tratamientos TA y TD permanecen intermedios. También existe un efecto en la producción de heces, donde el tratamiento TD presenta la mayor excreción por kg de MS al día, los demás tratamientos TA, TC y TB son menores y similares entre sí. En general también se observa que a mayor excreción de heces menor la digestibilidad de la MS y por el contrario a menor excreción de heces mayor digestibilidad de la MS.

El Cuadro 8 presenta los resultados para la GDP, consumo de materia seca digestible (CMSD), consumo de FDN (CFDN), contenido de FDN en heces, consumo de FDN digestible y digestibilidad de la FDN (DFDN%). Se observa que para la GDP existieron diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.03$), el tratamiento TD presentó la GDP más alta, seguido por el tratamiento TC, mientras que el tratamiento TB presentó la menor ganancia de peso seguido por el tratamiento TA. El Cuadro 8 también muestra que existieron diferencias significativas en el contenido de FDN en heces, $p = 0.004$, y digestibilidad de la FDN

(DFDN%), p = 0.04, observándose que a mayor contenido de FDN en heces menor digestibilidad de la FDN.

Cuadro 8. Promedios de CMS, GDP, CMSD, CFDN, contenido de FDN en heces, CFDN digestible y DFDN% para los cuatro tratamientos a las 24 horas, 48 horas y 72 horas.

Tratamiento	GDP Kg	CMSD, kg/d	CFDN kg/MS/d	FDN en heces kg/MS/d	CFDN digestible kg/MS/d	DFDN %
TA	0.4^{ab} ± 0.3	3.8 ± 0.2	3.5 ± 0.3	1.8^{a} ± 0.3	1.6 ± 0.1	48.5^{ab} ± 5.7
TB	0.2^{b} ± 0.2	3.2 ± 0.7	2.9 ± 0.7	1.4^{b} ± 0.3	1.5 ± 0.4	51.4^{a} ± 2.0
TD	1.3^{a} ± 0.5	3.3 ± 0.2	3.2 ± 0.2	1.8^{a} ± 0.1	1.3 ± 0.2	42.0^{b} ± 5.8
TC	1.1^{ab} ± 0.5	3.3 ± 0.4	2.9 ± 0.4	1.4^{b} ± 0.1	1.5 ± 0.2	52.0^{a} ± 2.0
Valor, P	0.03	0.46	0.21	0.004	0.60	0.04

Literales entre renglones difieren estadísticamente P < 0.01 ± = desviación estándar. Prom. CMS kg/d = promedio de consumo de MS (kg al día); GDP = ganancia diaria de peso (kg); Prom. CMSD, kg/d = promedio de consumo de MS digestible (kg al día); CFDN = Consumo de la Fibra Detergente Neutro (kg de MS al día); FDN en heces kg/MS/d = FDN encontrada en las heces (kg de MS al día); CFDN digestible kg MS/d = consumo FDN digestible (kg de MS al día); y DFDN % = Porcentaje de digestibilidad de la FDN.

El tratamiento TC mostro el valor más alto del DFDN%, siendo estadísticamente superior al tratamiento TD. Los tratamientos TB y TA son valores intermedios, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero diferentes al TD. Las variables de promedio de CMSD por kg al día, consumo de la CFDN y consumo de CFDN digestible en kg de MS al día no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (P < 0.01), por lo que no hay una distinción de los valores entre los tratamientos.

El Cuadro 9 presenta los resultados obtenidos del análisis de fenoles totales, taninos totales y taninos condensados para las plantas utilizadas como aditivos.

Cuadro 9. Porcentaje de fenoles totales, taninos totales y taninos condensados de los aditivos suministrados.

Aditivo	Fenoles totales (%)	Taninos totales (%)	Taninos condensados (%)
Cocoite	0.06	0.06	2.5
Cosmos	2.5	1.4	3.7
Caulote	10.4	7.4	17.9
Cirian	0.72	0.46	2.6

Estos resultados se obtuvieron mediante el análisis bromatológico en laboratorio de los aditivos utilizados.

El Cuadro 10 presenta el porcentaje de inclusión de los mismos metabolitos secundarios para cada uno de los tratamientos evaluados, estos resultados se obtuvieron a partir de la sumatoria del porcentaje de fenoles totales, taninos totales y taninos condensados, multiplicados por los gramos suministrados (en MS) de los aditivos en cada tratamiento.

Cuadro 10. Porcentaje de inclusión fenoles totales, taninos totales y taninos condensados por cada gramo de MS de aditivo suministrado en los tratamientos.

Aditivo/Tratamiento	Fenoles totales (%)	Taninos totales (%)	Taninos condensados (%)
C	0.00	0.00	0.00
TB	0.15	0.10	0.05
TC	1.84	1.32	3.57
TD	1.23	0.84	2.49

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Considerando la composición nutrimental, así como los niveles de inclusión de los aditivos con diferentes combinaciones de follajes arbóreos y herbáceos en los tratamientos, la presente discusión de resultados analiza el efecto de la suplementación sobre la eficiencia digestiva y las emisiones de CH_4 de los novillos. La discusión esta ordenada de acuerdo con los cuadros de resultados obtenidos, enfatizando las diferencias estadísticamente significativas encontradas y los posibles mecanismos de los factores metabólicos y bilógicos involucrados en la respuesta animal observada.

1. Discusión de resultados del Cuadro 7. Emisión de CH_4, CMS, rendimiento de CH_4, IE de CH_4, DMS % y producción de heces, respectivamente para los cuatro tratamientos.

Respecto a los factores evaluados, la IE de CH_4 ($P < 0.02$) y la producción de heces ($P < 0.01$), presentaron diferencias estadísticamente significativas.

Intensidad de emisión (g CH4/kg GDP)

La IE de CH_4 en el tratamiento TB que tiene un nivel de inclusión de 220 g MS de *Crescencia alata* y presentó el valor más alto ($656.0^{a} \pm 370$), mientras los tratamientos TC y TD presentaron los valores más bajos de IE de CH_4 ($139.9^{b} \pm 60.3$ y $128.2^{b} \pm 74.8$ respectivamente). La baja IE de CH_4 en el tratamiento TC sugiere una mayor eficiencia energética, ya que se emite menos CH_4 por cada kg de peso ganado (Piñeiro-Vásquez *et al*., 2015), es decir menos energía se pierde como CH_4 y posiblemente se dirige hacia la ganancia de peso, de hecho, se observó que el tratamiento TC emitió 9% menos CH_4 que el tratamiento TA. Este efecto antimetanogénico puede atribuirse a la presencia de metabolitos secundarios como los taninos condensados presentes en *Gliricidia sepium* (Cruz Matías *et al*., 2025), los cuales actúan modulando la microbiota ruminal y reducen la población de arqueas metanogénicas y protozoarios (Ku-Vera *et al*., 2020); en el caso del tratamiento TD la presencia de azúcares solubles de la *Guazuma ulmifolia*

(Hernández-Maldonado, 2012), los cuales modulan el microbiota ruminal y favorecen las rutas fermentativas al reducir la perdida de energía en forma de gas (Vázquez-Carrillo *et al*., 2023). La literatura indica que los taninos condensados se unen a las proteínas y polisacáridos para formar complejos que reducen la producción de H_2 metabólico, usado por los metanogénos para la reducción de CO_2, que reduce a su vez el CH_4 del rumen (hasta un 63%); también se aumenta la GDP hasta un 26% por el aumento de flujo de la proteína no degradable en rumen (PNDR), sin embargo, es recomendable que la incorporación de los taninos condensados en la ración de los rumiantes sea de un máximo de 3-6% del CMS (Piñeiro-Vásquez *et al*., 2015), ya que en mayores cantidades puede afectar la digestibilidad de la dieta o bien llegar a ser tóxicos para el animal.

Producción de heces (kg MS/día)

Con respecto a la producción de heces, el tratamiento TD (mezcla de los cuatro aditivos) mostro la mayor excreción de MS en la producción de heces ($3.0^a \pm 0.2$) en comparación de los otros tratamientos. Esto sugiere que la mezcla de los cuatro aditivos en TD pudo alterar la tasa de pasaje o reducido la digestibilidad de la fibra de los alimentos, aumentando el residuo fecal (Aguilar, 2009), lo cual efectivamente ocurrió, ya que en el Cuadro 2 se observa que si bien el CMS y el CMSD fue similar entre tratamientos, la excreción de la FDN en las heces fue mayor que los tratamientos con otros aditivos (TB y TC), además la DFDN% fue la menor entre todos los tratamientos ($p<0.04$) y también presentó la DMS numéricamente más baja, es decir si hubo un efecto negativo sobre la digestibilidad de la MS y de la fibra en esta. Sin embargo, esta reducción en la digestibilidad no se vio acompañada por una reducción en la emisión de CH_4 como se esperaría, aunque este tratamiento presentó la IE CH_4 más baja, pero para este comportamiento no tenemos una explicación aunque podemos hipotetizar que la mayor GDP se debe a la proteína y energía extra que aportan la mezcla de cirian, caulote y cocoite, lo cual resulto en un mejor funcionamiento del rumen y por lo tanto mayor aporte de nutrientes al animal (Hernández Maldonado, 2012 y Ku-Vera *et al*., 2020).

Los factores evaluados de los resultados experimentales donde no existen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$):

Digestibilidad de la Materia Seca

La DMS % no tuvo diferencias estadísticamente significativas ($P = 0.08$). Se observó que el tratamiento TC tuvo una tendencia superior (58.2% ± 0.8) respecto a los otros tratamientos. Es posible que la composición de *Gliricidia sepium* rica en taninos condensados y proteína cruda de hasta 24% mejoraron el funcionamiento del microbioma ruminal y el aprovechamiento de los nutrimentos de la dieta base (Manríquez-Mendoza *et al*., 2011). La combinación de leguminosas y arbóreas optimiza el aprovechamiento de la dieta base, en contraste con los reportes de Patra y Saxena (2010), que mencionan que, en muchos casos la reducción de metano mediante fitoquímicos suele ocurrir a expensas de una caída en la digestibilidad total (Min *et al*., 2020).

Los resultados respectivos a la emisión total de metano (g/día), y el CMS entre los diferentes tratamientos sugieren que la inclusión con aditivos vegetales no altero la palatabilidad de la dieta base, ni el volumen absoluto de gas producido por la fermentación entérica. Estos hallazgos coinciden con las investigaciones anteriores realizadas por Castelán-Ortega y su equipo que experimentaron con *Cosmos bipinnatus* y *Cymbopogon citratus*. No se observaron efectos significativos sobre el CMS, sugiriendo que en dosis bajas de metabolitos secundarios son asimilables por el ganado bovino (Vázquez Carrillo *et al*., 2023).

2. Discusión de resultados del Cuadro 8. CMS, GDP, CMSD%, CFDN, contenido de FDN en heces, CFDN digestible y digestibilidad de la FDN para los cuatro diferentes tratamientos.

Las variables con diferencias estadísticamente significativas fueron la GDP ($P = 0.03$), el contenido de FDN en heces ($P = 0.004$) y la DFDN % ($P = 0.04$). La relevancia de estas variables evaluadas se centra en el efecto significativo del

desempeño productivo y el aprovechamiento de la fibra como fuente de energía para el animal.

Ganancia Diaria de Peso

Respecto a la GDP, el tratamiento TD ($1.3^{a} \pm 0.5$) fue significativamente superior a TB ($0.2^{b} \pm 0.2$), mientras que el tratamiento TC ($1.1^{ab} \pm 0.5$) tiene tendencia positiva también en la GDP. Pese a que el tratamiento TD tiene mayor tendencia de excreción fecal, existe una tendencia positiva para la GDP, ya que la composición de los aditivos con taninos puede aumentar la GDP hasta un 26% (Piñeiro-Vásquez *et al*., 2015). Min *et al*. (2022) indica que esto se asocia al aumento de flujo de proteína de sobrepaso (proteína de baja degradación ruminal) hacia el intestino delgado, mejorando el balance de aminoácidos que aprovecha directamente el animal sin ser asimilada por los microbios del rumen (Piñeiro-Vásquez *et al*., 2015). Además, *Gliricidia sepium* es reconocida por su alto contenido de PC (24.1%) y elevada digestibilidad, lo que mejora la calidad de la dieta base siempre y cuando se incorpore en las dosis adecuadas (Cruz Matías *et al*., 2025).

Contenido de FDN en heces

El contenido de la FDN en heces de los tratamientos TD y TA presentaron mayor excreción fecal ($1.8^{a} \pm 0.1$ y $1.8^{a} \pm 0.3$ respectivamente), comparado con los tratamientos TB y TC ($1.4^{b} \pm 0.3$ y $1.4^{b} \pm 0.1$ respectivamente), lo que indica una menor desaparición de la fracción fibrosa en el tracto digestivo, pues como se había mencionado los taninos tienden a formar complejos con la fibra y la proteína lo que les permite sobrevivir a la fermentación microbiana.

Digestibilidad de la FDN

Respecto a la DFDN %, el tratamiento TC presento el valor más alto ($52.0^{a} \pm 2.0$ %), superando estadísticamente a TD ($42.0^{ab} \pm 5.8$); lo que sugiere que la combinación de *Gliricidia sepium* y *Guazuma Ulmifolia* optimiza la fermentación de carbohidratos estructurales, a diferencia de TD, donde la mayor diversidad de metabolitos secundarios podría haber inhibido indirectamente el microbiota del

rumen porque se disminuye la adherencia de las bacterias a las paredes celulares de los alimentos vegetales, afectando la actividad de las enzimas fibrolíticas microbianas (Vázquez Carrillo *et al*., 2023). También esto explica por qué el tratamiento TC tuvo una menor IE de CH_4; Beauchemin *et al*. (2018) explica que una degradación más eficiente de carbohidratos estructurales en el rumen mejora el ambiente fermentativo y reduce el sustrato disponible para la metanogénesis. La eficiencia en la digestibilidad de la fibra se asocia con una fermentación más eficiente y una reducción del sustrato disponible para las arqueas metanogénicas (De Souza *et al*., 2021). La menor digestibilidad en TD explica su mayor contenido de FDN en heces (1.8ª ± 0.1 kg) en comparación con TC y TB con (1.4b ± 0.1/0.3 kg respectivamente).

En cuanto a los efectos asociativos, la superioridad del tratamiento TC en la DFDN % frente a TD, sugiere que la complejidad de la mezcla de los cuatro aditivos con la dosis suministrada de metabolitos secundarios podría haber generado interacciones que limitaron la actividad celulolítica de la microbiota ruminal (Vázquez Carrillo *et al*., 2020). Cuando se disminuye la adherencia bacteriana a las paredes celulares de las plantas se limita la actividad de las enzimas fibrolíticas (Min *et al*., 2020). Por el contrario, la combinación de leguminosas y arbóreas en el tratamiento TC parece promover un ambiente ruminal más saludable y equilibrado (Cuervo *et al*., 2013).

3. Discusión de resultados del Cuadro 9 y 10. Porcentaje de fenoles totales, taninos totales y taninos condensados de los aditivos suministrados.

El análisis químico de los aditivos suministrados explica los factores biológicos obtenidos los resultados en el Cuadro 9 y 10.

La concentración de taninos es más alta en el tratamiento TC, ya que se suministró la cantidad de taninos condensados de 3.57% y fenoles totales de 1.84% por gramos de MS de aditivo. En el tratamiento TB compuesto por *Guazuma ulmifolia* destaca de manera individual por su alto contenido de taninos condensado (17.95%), lo que explica el valor más bajo en cuanto a las emisiones de CH_4, 14% menos que el tratamiento TA.

La alta concentración de taninos condensados en el tratamiento TC explica la baja IE de CH_4. Los taninos forman complejos con las proteínas dietéticas, protegiéndolas de la degradación ruminal excesiva y mejorando la utilización eficiente del nitrógeno (Aboagye, y Beauchemin, 2019). Los resultados obtenidos son congruentes con las investigaciones de Jayanegara *et al*. (2011) quien mediante metaanálisis confirmo una relación consistente entre los niveles de taninos en la dieta y la reducción de síntesis de metano entérico. Esto componentes también ayudan a mitigar la perdida de energía en forma de gas y canaliza a los nutrientes al crecimiento, que se refleja en la GDP en los tratamientos TC y TD (Ku-Vera *et al*., 2020).

Los resultados demuestran que los aditivos vegetales evaluados tienen un impacto diferenciando en el metabolismo de los novillos en crecimiento. Mientras que el tratamiento TC resulto ser más efectivo para reducir la IE de CH_4 y mejorar la digestibilidad de la fibra, el tratamiento TD favorece una mayor GDP, a pesar de aumentar la excreción de materia fecal.

Estos hallazgos validan parcialmente la hipótesis de que la complementación con aditivos naturales puede mitigar el impacto ambiental (en términos de emisión de CH_4), sin comprometer la digestibilidad o el crecimiento del animal, siendo la combinación del tratamiento TC la que presenta el mejor balance entre eficiencia productiva y mitigación de gases de efecto invernadero.

IX. CONCLUSIÓN

A partir de la investigación realizada, se comprobó que la suplementación con aditivos de diferentes componentes vegetales del trópico mexicano es una estrategia viable para reducir la IE de CH_4, sin comprometer el consumo voluntario de MS de los novillos en crecimiento. Específicamente, se demostró que, aunque la emisión total de CH_4 (g/día) no varía significativamente, la IE de CH_4 producidos por cada kg de GDP, disminuye drásticamente con tratamientos específicos de los propuestos.

Se comprobó que el tratamiento TC, es la opción más equilibrada para mejorar el desempeño productivo en cuanto GDP, a pesar de presentar un nivel alto de excreción de heces. La inclusión de los fitoquímicos en dosis bajas puede compensar las ineficiencias digestivas mediante un mayor flujo de nutrientes hacia el crecimiento.

Finalmente, se comprobó que los metabolitos secundarios son agentes moduladores de la microbiota ruminal en concentraciones adecuadas, permitiendo redirigir la energía que usualmente se pierde como gas metano hacia procesos metabólicos que mejoran la GDP, validando el usos e recursos arbóreos locales como una alternativa económica ambientalmente responsable frete al uso de otros suplementos químicos.

Se recomienda seguir investigando los diferentes niveles de inclusión y evaluar con mayor profundidad los mecanismos microbiológicos responsables de estos efectos para fortalecer su aplicación en sistemas ganaderos pertenecientes al trópico de México.

X. REFERENCIAS

Aboagye, I. A., & Beauchemin, K. A. (2019). Potential of Molecular Weight and Structure of Tannins to Reduce Methane Emissions from Ruminants: A Review. *Animals: an open access journal from MDPI*, *9*(11), 856. https://doi.org/10.3390/ani9110856

Aguilar Juárez, J. (2019). *Evaluación de la producción de biogás a partir del estiércol bovino mediante biodigestión anaerobia.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur]. Repositorio Institucional UABCS. Recuperado de https://biblio.uabcs.mx/tesis/te3523.pdf

Álvarez Lopeztello, J., Rivas Manzano, I. V., Aguilera Gómez, L. I., & González Ledesma, M. (2016). *Diversidad y estructura de un pastizal en El Cerrillo, Piedras Blancas, Estado de México, México*. Revista Mexicana de Biodiversidad, 87, 980–989. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.006

Andersen, T. O., Kunath, B. J., Hagen, L. H., Arntzen, M. Ø., & Pope, P. B. (2021). *Rumen metaproteomics: Closer to linking rumen microbial function to animal productivity traits. Methods*, 186, 42-51. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.07.011

Barajas, R. Jiménez D. y Velázquez E. (2021). *Manual de prácticas de laboratorio de investigación en nutrición y producción animal*. FMVZ-UAS. https://fmvz.uas.edu.mx/MyP/MANUAL%20DE%20PRACTICAS%20LAB%20INVESTIGACION.pdf

Beauchemin, K., Kreuzer, M., O'Mara, F., Mcallister, T. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *48*(2) 21-27. DOI: 10.1071/EA07199

Beauchemin, K., Ungerfeld, E., Eckard, R., Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, *14*, Supplement 1, 2-16. https://doi.org/10.1017/S1751731119003100

Canul Solis, J., Piñeiro Vázquez, A., Arceo Castillo, J., Alayón Gamboa, J., Ayala Burgos, A., Aguilar Pérez, C., Solorio Sánchez, F., Castelán Ortega, O., Lachica López, M., Quintana Owen, P., y Ku Vera, J. (2017). Design and construction of low-cost respiration chambers for ruminal methane measurements in ruminants. *Revista mexicana de ciencias pecuarias,* *8*(2), 185-192. https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i2.4442

Costa, A., Posada, N., Rodríguez N., y Rosero, R. (2012). Comparación de métodos para la determinación del valor energético de alimentos para rumiantes. Revista MVZ Córdoba, 17, 3. https://www.redalyc.org/pdf/693/69325096013.pdf

Cruz Matías, C., Avilés Nova, F., Nahed Toral, J., Trujillo Vázquez, R. J., Herrera Camacho, J., & Castelán Ortega, O. A. (2025). Evaluación de Gliricidia sepium y pulpa de café sobre la emisión de metano entérico en bovinos. *Avances En Investigación Agropecuaria*, *29*(2), 70–71. https://doi.org/10.53897/RevAIA.25.29.84

Cuervo-Jiménez, Alberto, Narváez-Solarte, William y Hahn von-Hessberg, Christine. (2013). Caracteristicas forrajeras de la especie *Gliricidia sepium* (Jacq.) Stend, FABACEAE. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural,* *17*(1), 33-45. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30682013000100003&lng=en&tlng=es

De Souza, S. O., Silva, R. R., Da Silva, F. F., Da Silva, A. P. G., Da Conceição Santos, M., Barbosa, R. P., Xavier, R. L., Paixão, T. R., Da Costa, G. D., Peruna, A. B., Souza, M. S., & Santos, L. V. (2021). Manejo nutricional de novillos criados en pastoreo y en corral: efectos en el consumo, digestibilidad, rendimiento y viabilidad económica. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, *12*(1), 105-119. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i1.5076

FAO. (2017). Desarrollo de cadenas de valor alimentarias sostenibles: principios rectores. Roma: Organización de las naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1695b1e1-31d4-47ab-9ad5-3e83c0a3587d/content

Fernández, H. (2010). Tabla de composición de alimentos para rumiantes. Nutrición Animal, INTA EEA Balcarce.

García, J. & Gingins, M. (1969). *Anatomía y fisiología del aparato digestivo de los rumiantes.* Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/02-anatomia_fisiologia_digestivo.pdf

Guzmán, A. (2011). *Evaluación del óxido de cromo y del dióxido de titanio como marcadores de la digestibilidad aparente en ovinos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/2502cb12-e693-4c17-8951-ec39d2d70e94/content

Heike Vibrans (ed.). (2009). *Malezas de México*, *Ficha - Cosmos bipinnatus Cav*. CONABIO, Gobierno de México.

Henao. G., Fajardo, R. & Desphane, P. (1972). Estudio comparativo de los métodos in vivo e in vitro en pruebas de digestibilidad de bovinos. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 34 (1-2), 43-58. file:///C:/Users/DELL/Downloads/Dialnet-EstudioComparativoDeLosMetodosInVivoEInVitroEnPrue-10103688.pdf

Hernández Maldonado G. (2012). Composición químico Nutricional de frutos de especies arbóreas forrajeras: cirián (*Crescentia alata*), caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Bonete (*Jaracatia mexicana*) del municipio de Carácuaro, Michoacán. [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio Institucional de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/1853/1/IIAF-M-2012-0003.PDF

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team: R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.) IPCC. Suiza. 151 pp.

Jayanegara, A., Goel, G., Makkar, P. & Becker, K. (2015). Divergence between purified hydrolysable and condensed tannin effects on methane emission, rumen fermentation and microbial population in vitro. *Animal Feed Science and Technology*, *209*, 60-68. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.08.002

Jayanegara, A., Leiber, F. y Kreuzer, M. (2011). Metaanálisis de la relación entre el nivel de tanino en la dieta y la formación de metano en rumiantes a partir de experimentos *in vivo* e *in vitro*. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 96*, 365-375. https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x

Jefferson, A., Costa-Campos, A., Nascimento-Coutino, D., Soares-Freitas, C. A., dos-Anjos, A. J., & Rocha-Bezerra, L. (2022). Efecto de la dieta sobre los parámetros ruminales y la microbiota ruminal: revisión. Revista Colombiana de Ciencia Animal – RECIA, 14(1). https://doi.org/10.24188/recia.v14.n1.2022.886

Johnson, K. A., y Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science,* 73(8), 2483-2492. https://2024.sci-hub.se/6649/fff166fa6c2f385aecd60a7a6c9c8234/10.2527@1995.7382483x.pdf

Ku-Vera, J., Castelán-Ortega, O., Galindo-Maldonado, F., Arango, J., Chirinda, N., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S., Flores-Santiago, E., Montoya-Flores, M., Molina-Botero, I., Piñeiro-Vázquez, A., Arceo-Castillo, J., Aguilar-Pérez, C., Ramírez-Avilés, L., & Solorio-Sánchez, F. (2020). Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal*, *14*(S3), 453 - 463. https://doi.org/10.1017/s1751731120001780

Ku Vera, J. C., Jiménez Ocampo, R., Valencia Salazar, S. S., Montoya Flores, M. D., Molina Botero, I. C., Arango, J., Gómez Bravo, C. A., Aguilar Pérez, C. F., y Solorio Sánchez, F. J. (2020). Role of secondary plant metabolites on enteric

methane mitigation in ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*, 584. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584

Ku-Vera, J., Valencia-Salazar, S., Piñeiro-Vázquez, A., Molina-Botero I., Arroyave-Jaramillo, J., Montoya-Flores, M., Lazos-Balbuena, F., Canul-Solís, J., Arceo-Castillo, J., Ramírez-Cancino, L., Escobar-Restrep, C., Alayón-Gamboa, J., Jiménez-Ferrer G., Zavala-Escalante, L., Castelán-Ortega, O., Quintana-Owen, P., Ayala-Burgos, A., Aguilar-Pérez, C., & Solorio-Sánchez, F. (2018). Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. *Agricultural and Forest Meteorology, 258*, 3-7. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.008

Lachmann, M., & Febres, O. (2009). *La estimación de la digestibilidad en ensayos con rumiantes.* Memorias del X Congreso de la Asociación Venezolana de Producción Animal. Recuperado de http://avpa.ula.ve/docuPDFs/xcongreso/Digestibilidaderumiantes.pdf

Manríquez-Mendoza, Leonor Yalid, López-Ortíz, Silvia, Pérez-Hernández, Ponciano, Ortega- Jiménez, Eusebio, López-Tecpoyotl, Zenón Gerardo, & Villarruel-Fuentes, Manuel. (2011). Agronomic and forage characteristics of Guazuma ulmifolia Lam. *Tropical and subtropical agroecosystems, 14*(2), 453-463. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200001&lng=es&tlng=

Mayer, A. F., Bolleta, A., Lagrange, S. P., & Larrea, D. R. (2008). *Evaluación de la calidad nutricional de diferentes estados de madurez del cultivo de avena para la obtención de henos o silaje de planta entera*. Nutrición Animal, INTA EEA Balcarce.

McDonald, P., Edwards R., Greenhalgh J., Morgan C., Sinclair L. y Wilkinson R. (2010). Animal Nutrition (7th ed.). PEARSON. Recuperado de file:///C:/Users/DELL/Downloads/animal-nutrition-7th-edition.pdf

Mendoza Martínez, G. D., & Ricalde Velasco, R. (2016*). Alimentación de ganado bovino con dietas altas en grano* (2.ª ed.). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. ISBN 978-607-28-1031-0

Min, B.-R., Lee, S., Jung, H., Miller, DN y Chen, R. (2022). Emisiones de metano entérico y rendimiento animal en la producción de ganado lechero y de carne: estrategias, oportunidades e impacto de la reducción de emisiones. *Animals, 12*(8), 948. https://doi.org/10.3390/ani12080948

Min, R., Solaiman, S., Waldrip, H., Parker, D., Todd, R. & Brauer D. (2020). Dietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options. *Animal Nutrition*, *6*, 231-246. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.05.002

Mohammed B., González-Ronquillo M., Avilés-Nova F., Vázquez-Carrillo M. y Castelan-Ortega, O. (2023). Efecto de la digestibilidad de la fibra en la emisión de metano, la producción de leche y la calidad en el ganado lechero. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 31*, 213-220. https://doi.org/10.53588/alpa.310538

Molina-Botero, I., Arroyave-Jaramillo, J., Valencia-Salazar, S., Barahona-Rosales, R., Aguilar-Pérez, C., Ayala Burgos, A., Jacobo Arango, y Ku-Vera, J. (2019). Effects of tannins and saponins contained in foliage of Gliricidia sepium and pods of Enterolobium cyclocarpum on fermentation, methane emissions and rumen microbial population in crossbred heifers. *Animal Feed Science and Technology, 251*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.01.011

Montenegro Ballestero, J., Barrantes Guevara, E., & Ivankovich Cruz, S. (2019). Cuantificación de metano entérico según estado fisiológico en vacas lecheras de alta producción en Costa Rica. *Agronomía Costarricense, 44*(1). https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.40003

National Research Council (NRC). (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev. ed.). Washington, D.C. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/9825

Paniagua-Ibánez, M., López-Caamal, A., Mussali-Galante, P., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, M., Ramírez-Rodríguez, R. y Tovar-Sánchez, E. (2015). Variación morfológica de Cosmos bipinnatus (Asteraceae) y su relación con variables abióticas en el centro de México. *Revista chilena de historia natural, 88*, 1-13. https://dx.doi.org/10.1186/S40693-015-0044-4

Patra, K. & Saxena, K. (2010). A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry, 71*(11–12), 1198-1222. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.05.010

Pineda, S. H., Beltrán, P. E., Benaouda, M., García, J. M. P., Nova, F. A., Molina, L., & Ortega, O. A. C. (2018). Pithecellobium dulce, Tagetes erecta and Cosmos bipinnatus on reducing enteric methane emission by dairy cows. *Ciência Rural*, *48*(10). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170484

Piñeiro-Vázquez, A., Canul-Solís, J., Alayón-Gamboa, J., Chay-Canul, A., Ayala-Burgos, A., Aguilar-Pérez, C., Solorio-Sánchez, F., & Ku-Vera, J. (2015). Potencial de los taninos condensados para la reducción de emisiones de metano entérico y su efecto sobre la productividad de rumiantes. *Archivos de Medicina Veterinaria*, *47*(3), 263-272.

Plascencia J. A., Arellano G. E., López Soto, M. A., y Avery Zinn, R. (2009). Estudio comparativo sobre el sitio y la tasa de digestión de la fracción nitrogenada y del almidón de cuatro cereales procesados con vapor utilizados en dietas para bovinos de engorda. *Veterinaria México OA, 33*(004). https://doi.org/10.21753/vmoa.33.004.74

Portela, D. F., Cervantes Gómez, D., Escobar-España, J. C., Sánchez Santillán, P., & Curzaynz, K. R. (2022). *Estrategias para reducir las emisiones de*

metano entérico en rumiantes. Revista de Ciencias Agropecuarias, 8(2), 7-22. https://doi.org/10.36436/24223484.656

Ramírez, J. F., & López, M. A. (2014). *Metanogenesis ruminal y estrategias para su mitigación*. CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 9(2), 113-123. https://doi.org/10.1900-9607/S1900-96072014000200014

Ramírez, S. (2010). *Digestibilidad de diversos granos y pastas proteícas utilizadas en la alimentación del ganado (una revisión).* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio institucional UAAAN.

Relling, A. E., & Mattioli, G. A. (2003). Fisiología digestiva y metabólica de los rumiantes. Facultad de ciencias veterinarias, Universidad Nacional dela Plata. Recuperado de https://ganaderiasos.com/wp-content/uploads/2014/08/fisiologia-digestiva-y-met-de-los-rumiantes.pdf

Rojas Hernández, S., Avilés Nova, F., Castelán Ortega O., García Martínez A., Olivares Pérez, J. y Valencia Almazán M. (2012). Composición Química, Digestibilidad In Vitro del Follaje Guazuma ulmifolia y Crescentia alata y su Uso en la Alimentación de Corderos. *Revista de Nutrición de Pakistán*, *11*(12), 1139–1145. https://doi.org/10.3923/pjn.2012.1139.1145

Soriano, M. D. (2016). *Producción de gas y digestibilidad in vitro de frutos y semillas de árboles forrajeros como alimentos en rumiantes*. [Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio Institucional de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/13231/FMVZ-L-2016-1549.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tilley, J. & Terry, R. (1963). A two-stage techique for the in vitro digestión of forage crops. *Journal of the British Grassland Society*, *18*(2), 104-111. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x

Tlapanco, M. (2024). *Clasificación Internacional del NRC e INRA de los alimentos.* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Ciencia Animal, Departamento de Nutrición Animal.

Tseten, T, Sanjorjo, R. A., Kwon, M., & Kim, S. W. (2022). Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Animals. *Journal of microbiology and biotechnology*, *32*(3), 269–277. https://doi.org/10.4014/jmb.2202.02019

Valencia Salazar, S., Piñeiro Vázquez, Á., Molina Botero I., Lazos Balbuena, F., Uuh Narváez. J., Segura Campos, M., Ramírez Avilés, L., Solorio Sánchez, F., y Ku Vera, J. (2018). Potencial de la harina de vainas de Samanea saman para la mitigación del metano entérico en novillas mestizas alimentadas con pasto tropical de baja calidad. *Meteorología Agrícola y Forestal*, *258*, 108-116. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.262

Van Soest, P. J. (1994). *Nutricional ecology of the rumiant* (2nd ed.). Cornell University Press.

Vázquez Carrillo, M. (2022). *Estimación del aporte de energía metabolízale en bovinos F1 y desarrollo de estrategias de mitigación de emisiones de metano por fermentación entérica.* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México. https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000822225

Vázquez-Carrillo, M., Montelongo-Pérez, H. D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E. y Castelán-Ortega, O. A. (2020). Efectos de tres hierbas sobre las emisiones de metano del ganado vacuno. *Animales, 10*(9), 1671. https://doi.org/10.3390/ani10091671

Vázquez Carrillo M., Zaragoza-Guerrero, R., Corona-Gochi, L., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2023). Evaluación del efecto de Cymbopogon citratus sobre el consumo, digestibilidad, emisión de metano y partición de la energía en bovinos en crecimiento. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, *31*, 207-212. https://doi.org/10.53588/alpa.310537

Zhao, X., Zhang, S., & Zhang, Y. (2025). Tannin-Based Strategies for Mitigating Greenhouse Gas Emissions Through Nitrogen and Carbon Metabolism in Ruminants. *Agriculture, 15*(21), 2234. https://doi.org/10.3390/agriculture15212234

VOTO APROBATORIO

Toda vez que el trabajo de evaluación profesional, ha cumplido con los requisitos normativos y metodológicos, para continuar con los trámites correspondientes que sustentan la evaluación profesional, de acuerdo con los siguientes datos:

Nombre del pasante	MASSIEL GUILLERMINA JIMENEZ NOVA				
Licenciatura	INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA	N° de cuenta	1614109	Generación	2021-2026
Opción	TESIS	Escuela de Procedencia			
Nombre del Trabajo para Evaluación Profesional	DETERMINACIÓN DE LA DIGESTIBILIDAD APARENTE Y EMISIONES DE METANO DE 4 TRATAMIENTOS CON ADITIVOS SUMINISTRADOS EN LA DIETA DE NOVILLOS EN CRECIMIENTO.				

	NOMBRE	FIRMA DE VOTO APROBATORIO	FECHA
ASESOR	DR. OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA		03/07/2026
COASESOR ASESOR EXTERNO (Sólo si aplica)	DRA. FRANCISCA AVILES NOVA		03/07/2026

	NOMBRE	FIRMA Y FECHA DE RECEPCIÓN DE NOMBRAMIENTO	FIRMA Y FECHA DE ENTREGA DE OBSERVACIONES	FIRMA Y FECHA DEL VOTO APROBATORIO
REVISOR	DR. ERNESTO JOEL DORANTES CORONADO	03/07/2026		6/08/2026
REVISOR	ING. AGRO. FERNANDO GARCIA NUÑEZ	03/07/2026		15/07/2026

Derivado de lo anterior, se le **AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN DEL TRABAJO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL** de acuerdo con las especificaciones del **anexo 8.7** "Requisitos para la presentación del examen de evaluación profesional".

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
ÁREA DE EVALUACIÓN PROFESIONAL	DRA. MARÍA ERENDIRA LÓPEZ JARAMILLO		

CENTRO UNIVERSITARIO
U.A.E.M.
TEMASCALTEPEC

DOCUMENTO EXCLUSIVAMENTE PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL